



# ESCOLA NAVAL

*talant de bî-faire*



Gonçalo João Dias de Paiva

## Desenvolvimento de um Veículo Autônomo Biomimético

Desenvolvimento da Estrutura e Mecanismo de Propulsão  
Alternativo

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
Ciências Militares Navais, na especialidade de Engenharia  
Naval Ramo de Mecânica



Alfeite  
2020





# ESCOLA NAVAL

talant de bi-faire



Gonçalo João Dias de Paiva

*Desenvolvimento de um Veículo Autónomo  
Biomimético*

*Desenvolvimento da Estrutura e Mecanismo de Propulsão  
Alternativo*

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
Ciências Militares Navais, na especialidade de Engenharia Naval Ramo  
de Mecânica

**Orientação de:** Engenheiro Bruno Damas

**Co-orientação de:** CFR EN-MEC ACN Pires da Silva

*O Aluno Mestrando,*

*O Orientador,*

---

Gonçalo Paiva

---

Duarte Damas

Alfeite  
2020



”Sobre a mente pesa o dever, sobre os ombros o orgulho” - Lema do curso João  
Baptista Lavanha (curso de oficiais da Escola Naval 2015-2020)



Gostaria de dedicar este trabalho à minha família, amigos próximos e camaradas, cujo apoio demonstrou-se imprescindível para a realização do mesmo, e sem o qual não teria sido possível manter altos ânimos face às adversidades que se revelaram na realização deste trabalho.





# Agradecimentos

Gostaria de agradecer ao engenheiro Bruno Damas pela orientação dada em todas as áreas de eletrónica e alimentação eléctrica do projeto, ao CFR EN-MEC (ACN) Pires da Silva pela co-orientação dada e disponibilidade para a resolução de problemas durante o desenrolar do mesmo e ao camarada ASPOF EN-AEL Rocha Araújo por embarcar comigo neste trabalho e ter ficado encarregue da parte de comando e controlo do veículo. Por último, gostaria de agradecer à Escola Naval, *alma mater* dos oficiais da Marinha Portuguesa, pela instrução que me forneceu e espírito que veio em mim desenvolver.



# Resumo

Este trabalho encontra-se inserido no projeto SABUVIS II, sendo o objetivo global do projeto criar um “cardume” de veículos autônomos de sub-superfície biomiméticos. Esse grupo será constituído por dois tipos de unidades, unidades controladoras cuja função é controlar e coordenar as restantes unidades por forma a executar a tarefa pretendida, e as unidades executantes cuja função é executar as ordens das unidades controladoras, por forma a executar tarefas que permitam o cumprimento duma missão, satisfazendo um padrão de requisitos operacionais.

O objetivo deste trabalho é desenvolver um protótipo duma unidade executante, começando pelo seu dimensionamento inicial e progredir no sentido de elaborar o seu projeto detalhado, incorporando o dimensionamento do seu sistema energético, do seu sistema de propulsão alternativa e do sistema de variação de fluabilidade, visando que a unidade custe o menos possível dado que, num cenário operacional, poderá ser necessário descartar uma destas unidades sem comprometer a capacidade operacional da força.

**Palavras-chave:** Veículos Autônomos de Sub-superfície, Veículos Autônomos de Sub-superfície Biomiméticos, Requisitos Operacionais, Dimensionamento Inicial, Projeto de Veículos Submarinos, Projeto Detalhado, Sistema de Propulsão Alternativo



# Abstract

This thesis is part of the SABUVIS II project, and the overall objective of the project is to create a swarm of autonomous biomimetic underwater vehicles. This group will consist of two types of units, controller units whose function is to control and coordinate the remaining units in order to perform the intended task, and the executing units whose function is to execute the orders of the controlling units, in order to perform tasks that allow the fulfillment of a mission, satisfying a standard of operational requirements.

The objective of this project is to develop a prototype of an executing unit, starting with its initial dimensioning and progressing towards elaborating its detailed project, incorporating the dimensioning of its energy system, its alternative propulsion system and the buoyancy variation system, aiming for the minimum cost since, in an operational scenario, it may be necessary to discard one of these units without compromising the operational capacity of the force.

**Keywords:** Autonomous Underwater Vehicles , Autonomous Biomimetic Underwater Vehicles, Operational Requirements, Initial Design, Submarine Vehicle Design, Detailed Design, Alternative Propulsion System



# Índice

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Estado da Arte</b>	<b>5</b>
2.1	Projeto SABUVIS II . . . . .	5
2.2	Sistemas . . . . .	7
2.2.1	Isolamento Mecânico . . . . .	8
2.2.2	Tipo de Propulsão . . . . .	9
2.2.3	Sistema de Alimentação de Energia . . . . .	14
2.2.4	Sensores/Atuadores ( <i>Payload</i> ) . . . . .	19
2.3	Aplicações . . . . .	24
<b>3</b>	<b>Requisitos e Conceito Inicial</b>	<b>25</b>
3.1	Requisitos . . . . .	25
3.2	Conceito Inicial . . . . .	26
<b>4</b>	<b>Desenvolvimento</b>	<b>31</b>
4.1	Atuadores, Sensores e Eletrônica . . . . .	31
4.1.1	Motores Propulsores . . . . .	31
4.1.2	Motores Passo-a-passo . . . . .	32
4.1.3	Sensores e Eletrônica . . . . .	34
4.1.4	Baterias . . . . .	35
4.2	Estrutura Mecânica . . . . .	37
4.2.1	Cilindro Central, Discos Estruturais e Varões de Suportes . .	37
4.2.2	Cobertura Frontal . . . . .	44
4.2.3	Cobertura Traseira/Cauda . . . . .	46
4.2.4	Barbatanas Peitorais . . . . .	46
4.2.5	Barbatana Dorsal . . . . .	48
4.2.6	Tanque de Flutuabilidade . . . . .	49
4.2.7	Instalação Propulsora . . . . .	51
4.2.8	Estruturas de Suporte em PLA . . . . .	53
4.3	Características do Protótipo . . . . .	53
4.3.1	Dimensões do Protótipo . . . . .	53
4.3.2	Margem de Flutuabilidade do Protótipo . . . . .	54
4.3.3	Cálculo de Lastro Fixo . . . . .	55
<b>5</b>	<b>Testes</b>	<b>59</b>
5.1	Preâmbulo . . . . .	59
5.2	Testes . . . . .	59
5.2.1	Teste de Estanquidade do Veículo . . . . .	59

5.2.2	Teste dos Tanques de Flutuabilidade . . . . .	60
5.2.3	Teste de Flutuabilidade do Veículo . . . . .	60
5.2.4	Teste de Mobilidade do Veículo . . . . .	60
5.2.5	Teste Misto . . . . .	61
<b>6</b>	<b>Lições Aprendidas e Trabalho Futuro</b>	<b>63</b>
6.1	Lições Aprendidas . . . . .	63
6.2	Trabalho Futuro . . . . .	64
	<b>Conclusão</b>	<b>67</b>
	<b>Bibliografia</b>	<b>69</b>
	<b>Apêndices</b>	<b>75</b>
A	Folha de Cálculo Excel - Estimativa Inicial	75
B	Estrutura - Desenhos Técnicos	77
C	Instalação Propulsora - Desenhos Técnicos	85
D	Tanques de Flutuabilidade - Desenhos Técnicos	93
E	Barbatanas Peitorais - Desenhos Técnicos	97
F	Barbatana Dorsal - Desenhos Técnicos	99
G	Baterias - Desenhos Técnicos	103
	<b>Anexos</b>	<b>105</b>
I	Resumo de vantagens e desvantagens da locomoção BCF	105
II	Resumo de vantagens e desvantagens da locomoção MPF	107
III	Características do Servo-motor JX BLS-12V7146	109
IV	Tubos de Aço Inox Disponíveis no Mercado	111
V	Dimensionamento dos O-rings dos Discos Estruturais	113
VI	Dimensionamento dos O-rings dos Varões das Barbatanas Laterais	115
VII	Características do Protótipo - Centro de Massa	117
VIII	Características do Protótipo - Centro de Impulsão	119



# Lista de Figuras

2.1	BUV1 desenvolvido pela Academia Naval Polaca . . . . .	6
2.2	BUV2 desenvolvido pela Universidade de Cracóvia . . . . .	6
2.3	BUV3 desenvolvido pela EN/FEUP/Oceanscan . . . . .	6
2.4	O-rings Utilizados em Protótipo da Escola Naval Polaca - Fotografia autorizada pela equipa de investigação da Escola Naval Polaca . . .	8
2.5	Servo Motores à Prova de Água . . . . .	8
2.6	BUV com Compliant Waterproof Skin (Esquerda) e Película Impermeável de Gel de Sílica (Direita) . . . . .	9
2.7	Uso de invólucro para isolar componentes principais . . . . .	9
2.8	Fixadores de Libertação Rápida . . . . .	9
2.9	Locomoção BCF . . . . .	10
2.10	Locomoção MPF . . . . .	10
2.11	Exemplos de BUV <i>Anguilliform</i> - AmphiBot II (em cima, à esquerda), Biorobotic Lampray (em cima, à direita), Amphibious Snakelike Robot (em baixo, à esquerda) e Salamandra Robotica II (em baixo, à direita) . . . . .	11
2.12	Exemplos de BUV <i>Subcarangiform</i> / <i>Carangiform</i> - Essex MT 1 Robotic Fish (em cima, à esquerda), Essex G9 Robotic Fish (em cima, ao centro), NAF I (em cima, à direita), SoFi (em baixo, à esquerda), UC-Ika 1 (em baixo, ao centro) e Robotic Shark (em baixo, à direita) . . . . .	11
2.13	Exemplos de BUV <i>Thunniform</i> - Dolphin Robot (à esquerda) e RoboTuna (à direita) . . . . .	12
2.14	Exemplos de BUV <i>Ostraciiform</i> - Boxybot (em cima, à esquerda), MARCO (em cima, à direita), <i>Ostraciiform</i> Fish Robot (em baixo, à esquerda) e Bionic Robotic Fish (em baixo, à direita) . . . . .	12
2.15	Exemplos de BUV <i>Rajiform</i> - BHRay (em cima, à esquerda), Raybot 3.3 (em cima, à direita), Robo-Ray II (em baixo, à esquerda) e Micro Biomimetic Manta Ray Robot Fish (em baixo, à direita) . . . . .	13
2.16	Exemplos de BUV <i>Labriiform</i> - <i>Labriiform</i> Fish Robot . . . . .	13
2.17	Exemplos de BUV <i>Gymnotiform</i> - Knifefish (à esquerda), NKF II (ao centro) e RoboGnilos (à direita) . . . . .	13
2.18	Exemplos de BUV <i>Diodontiform</i> - Autonomous Fin-Actuated Underwater Vehicle . . . . .	14
2.19	Jason/Medea engineering ROV system . . . . .	14
2.20	Protótipo do veículo NEMO . . . . .	14
2.21	Estação de carregamento automática para um BUV . . . . .	15
2.22	AUSI SAUV-II . . . . .	15
2.23	Sistema de <i>alimentação por cabo</i> . . . . .	15

2.24	Estações de Ancoragem Ondomotrizes . . . . .	18
2.25	Exemplo Servo-motor . . . . .	21
2.26	Ligas com memória de forma . . . . .	21
2.27	Atuador EAP . . . . .	22
2.28	Atuador Magnético . . . . .	22
3.1	TOBIAS . . . . .	29
4.1	Servo-motor JX BLS-12V7146 . . . . .	32
4.2	Dimensões das Seringas que constituem os Tanques de Flutuabilidade	32
4.3	Curva de Performance do motor NANOTEC LA421L13-A-TJCA .	34
4.4	Motor Passo-a-Passo LA421L13-A-TJCA . . . . .	34
4.5	Sensores Utilizados . . . . .	35
4.6	Baterias Lipo TATTU 16000mAh 14.8V 15/30C 4S1P . . . . .	37
4.7	Cilindro Central . . . . .	39
4.8	Pega do Cilindro Central . . . . .	39
4.9	Base dos Sensores do Cilindro Central . . . . .	40
4.10	Disco Estrutural AR Vista Isométrica (Esquerda), Anterior (Centro) e Posterior (Direita) . . . . .	41
4.11	Disco Estrutural AV V1 Vista Isométrica (Esquerda), Anterior (Cen- tro) e Posterior (Direita) . . . . .	42
4.12	Disco Estrutural AV V2 Vista Isométrica (Esquerda), Anterior (Cen- tro) e Posterior (Direita) . . . . .	42
4.13	Disco Estrutural AV V3 Vista Isométrica (Esquerda), Anterior (Cen- tro) e Posterior (Direita) . . . . .	43
4.14	Disposição dos Varões Estruturais Inicial (Esquerda) e Final (Direita)	44
4.15	Cobertura Frontal V1 (à esquerda) e União ao Disco Estrutural AV V1 (à direita) . . . . .	44
4.16	BlueRobotics Dome End Cap (à esquerda) e União ao Disco Estru- tural AV V2 (à direita) . . . . .	45
4.17	Cobertura Frontal V3 (à esquerda), Guarda da Cobertura (no centro) e União ao Disco Estrutural AV V3 (à direita) . . . . .	46
4.18	Cobertura Traseira (Esquerda) e Respetivos Moldes Externo (Centro) e Interno (Direita) . . . . .	46
4.19	Bucim das Barbatanas Laterais (à esquerda) e Respetivos Veios (à direita) . . . . .	47
4.20	Mecanismo das Barbatanas Laterais . . . . .	47
4.21	Adaptação de Barbatanas de Mergulho no BUV2 . . . . .	47
4.22	Barbatana Dorsal V1 (Esquerda) e V2 (Direita) . . . . .	48
4.23	Molde Externo (Esquerda ) e Interno (Direita) da Barbatana Dorsal	48
4.24	Acoplamento Barbatana Dorsal/Pega Cobertura Central . . . . .	49
4.25	Estruturas de Suporte dos Tanques de Flutuabilidade AV (em cima, à esquerda), AR (em cima, à direita), Peça de Acoplamento Se- ringa/Estrutura (em baixo, à esquerda) e Fim-de-curso (em baixo, à direita) . . . . .	50
4.26	Tanques de Flutuabilidade . . . . .	51
4.27	Placas em Acrílico Anterior (Esquerda) e Posterior (Direita) . . . .	51

4.28	Bases de Apoio Anterior (Esquerda) e Posterior (Direita) dos Servos em PLA . . . . .	52
4.29	Costelas em PLA Anterior (Esquerda) e Posterior (Direita) . . . .	52
4.30	Conectores em PLA Anterior (Esquerda) e Posterior (Direita) . . .	52
4.31	Instalação Propulsora . . . . .	53
4.32	Estrutura de suporte da Jestson Nano e Arduino Mega (Esquerda) e das baterias (Direita) . . . . .	53
4.33	Protótipo V3 . . . . .	54
4.34	Dimensões do Protótipo V3 - Vista Frontal (Esquerda) e Lateral (Direita) . . . . .	54
4.35	Análise de Forças e Momentos no Centro de Impulsão . . . . .	56
4.36	Distância entre a Origem do Referencial e o Lastro Fixo . . . . .	57
4.37	Sistema Lastro Fixo BUV3 . . . . .	58
A.1	Folha de Cálculo Excel - Estimativas Iniciais . . . . .	76
B.1	Base dos Sensores do Cilindro Central . . . . .	77
B.2	Guarda da Cobertura Frontal . . . . .	78
B.3	Cobertura Frontal V3 . . . . .	79
B.4	Cilindro Central V2 . . . . .	80
B.5	Cobertura Traseira - Molde Exterior . . . . .	81
B.6	Cobertura Traseira - Molde Interior . . . . .	82
B.7	Disco Estrutural AR . . . . .	83
B.8	Disco Estrutural AV V3 . . . . .	84
C.1	Base do Servo Anterior . . . . .	85
C.2	Costela Anterior . . . . .	86
C.3	Conector da Costela Anterior . . . . .	87
C.4	Placa de Acrílico Anterior . . . . .	88
C.5	Base do Servo Posterior . . . . .	89
C.6	Costela Posterior . . . . .	90
C.7	Conector da Costela Posterior . . . . .	91
C.8	Placa de Acrílico Posterior . . . . .	92
D.1	Peça de Encaixe das Seringas à Estrutura de Acoplamento AV . . .	93
D.2	Estrutura de Acoplamento AR . . . . .	94
D.3	Estrutura de Acoplamento AV . . . . .	95
E.1	Veio das Barbatanas Peitorais . . . . .	97
E.2	Bucim . . . . .	98
F.1	Peça de Acoplamento Barbatana Dorsal/Pega Cobertura Central . .	99
F.2	Barbatana Dorsal V2 - Molde Exterior . . . . .	100
F.3	Barbatana Dorsal V2 - Molde Interior . . . . .	101
F.4	Pega Cobertura Central V2 . . . . .	102
G.1	Trinco das Baterias . . . . .	103
G.2	Estrutura de Suporte das Baterias . . . . .	104

I.1	Resumo de vantagens e desvantagens locomoção BCF . . . . .	105
II.1	Resumo de vantagens e desvantagens locomoção MPF . . . . .	107
III.1	Características do Servo-motor JX BLS-12V7146 . . . . .	109
IV.1	Tubos de Aço Inox Disponíveis no Mercado . . . . .	111
V.1	Dimensionamento dos O-rings dos Discos Estruturais . . . . .	113
VI.1	Dimensionamento dos O-rings dos Varões das Barbatanas Laterais . . . . .	115
VII.1	Características do Protótipo - Centro de Massa . . . . .	117
VIII.	Características do Protótipo - Centro de Impulsão . . . . .	119

# Lista de Tabelas

2.1	Quadro-resumo do sistema de <i>alimentação por cabo</i> . . . . .	16
2.2	Quadro-resumo do uso de <i>baterias</i> . . . . .	17
2.3	Quadro-resumo do método de <i>conversão de energia</i> . . . . .	18
2.4	Sensores utilizados nos BUV . . . . .	19
2.4	Sensores utilizados nos BUV . . . . .	20
2.5	Comparação dos diversos Atuadores . . . . .	23
3.1	Quadro-Resumo de Objetivos de Projeto . . . . .	26



# Lista de Abreviaturas, Acrónimos e Símbolos

## Acrónimos

AR	A ré
AUG	Autonomous Underwater Gliders
AUV	Autonomous Underwater Vehicle
AV	Avante
BCF	Body and/or Caudal Fin
BUV	Biomimetic Underwater Vehicle
CCD	Charge Coupled Device
CFD	Computational Fluid Dynamics
CI	Centro de Impulsão
CM	Centro de Massa
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor
CNC	Computer Numerical Control
DC	Direct Current
EAP	Electroactive Polymer
EDA	European Defence Agency
GPS	Global Positioning System
IPMC	Ionic Polymer Metal Composite
ISR	Intelligence Surveillance Reconnaissance
MCFC	Molten Carbonate Fuel Cell

MFC Macro Fiber Composites

MIL Momento Inclinante Longitudinal

MPF Median and/or Paired Fin

NBR Nitrile-Butadiene Rubber

PAFC Phosphoric Acid Fuel Cell

PEBD Polietileno de Baixa Densidade

PEFC Polymer Electrolyte Fuel Cell

PELABD Poloetileno Linear Antiestático de Baixa Densidade

PEMFC Proton Exchanger Membrane Fuel Cell

PLA Políácido Láctico

PVC Polyvinyl chloride

SMA Shape Memory Alloys

SOFC Solid Oxide Fuel Cell

TMS Tether Management System

TOBIAS Transformable and Optimizable Biomimetic Innovative Autonomous System

TPE Tereftalato de Polietileno

UUV Unmanned Underwater Vehicles

## Símbolos

$m_{Lastro}$  Massa de Lastro Fixo [kg]

$n^o_{servos}$  Número de Servos Utilizados

$n^o_{stepper}$  Número de Motores Passo-a-Passo Utilizados

$\Delta$  Deslocamento [kg]

$\rho$  Densidade da Água [kg/m<sup>3</sup>]

$A_{Bat}$  Área da Superfície do Batente da Seringa [m<sup>2</sup>]



$A_{servos}$	Corrente dos Servos	[A]
$C.I.$	Impulsão do Navio	[N]
$C.M.$	Peso do Protótipo	[N]
$C_{baterias}$	Capacidade Necessária das Baterias	[A · h]
$C_{TATTU}$	Capacidade das Baterias TATTU	[A · h]
$D_{Bat}$	Diâmetro do Batente da Seringa	[m]
$d_{CI-Lastro}$	Distância entre o Centro de Impulsão e o Lastro Fixo	[m]
$d_{CI-O}$	Distância entre o Centro de Impulsão e a Origem do Referencial	[m]
$d_{CM-CI}$	Distância entre o Centro de Massa e o Centro de Impulsão	[m]
$d_{O-Lastro}$	Distância entre a Origem do Referencial e o Lastro Fixo	[m]
$E_{TATTU}$	Capacidade Energética das Baterias TATTU	[W · h]
$E_{total}$	Energia Total	[W · h]
$F_{passo-a-passo}$	Força a Exercer pelo Motor Passo-a-Passo	[N]
$g$	Aceleração Gravítica	[m/s <sup>2</sup> ]
$h$	Profundidade	[m]
$Lastro$	Peso do Lastro Fixo	[N]
$M_{Incl-Long}$	Momento Inclinante Longitudinal	[kg · m]
$M_{Marg}$	Margem de Massa para o Protótipo	[%]
$M_{Poss}$	Massa Possível para o Protótipo	[kg]
$M_{Prot}$	Massa do Protótipo	[kg]
$N^o_{bat-nec}$	Número de Baterias Necessárias	
$n^o_{horas}$	Autonomia Pretendida	[h]
$P$	Pressão	[Pa]
$P_0$	Pressão Atmosférica	[Pa]
$P_{cada-sensor}$	Potência de cada Sensor Utilizado	[W]

$P_{nom-stepper}$	Potência Necessária para um Motor Passo-a-Passo Operar à Profundidade de Projeto	[W]
$P_{perdas}$	Potência das Perdas	[W]
$P_{sensores}$	Potência Total dos Sensores Utilizados	[W]
$P_{servos}$	Potência dos Servos	[W]
$P_{stepper}$	Potência dos Motores Passo-a-Passo	[W]
$P_{total}$	Potência Total	[W]
$V_{baterias}$	Tensão das Baterias	[V]
$V_{Des}$	Volume Deslocado pelo Protótipo	[dm <sup>3</sup> ]
$V_{passo-a-passo}$	Velocidade do Motor Passo-a-Passo	[m/s]
$V_{servos}$	Tensão dos Servos	[V]

# Capítulo 1

## Introdução

A exploração do meio marinho e dos seus recursos é um desafio secular para o ser humano, que originou o desenvolvimento de veículos e tecnologias muito diversas e complexas (Raj & Thakur, 2016). O desenvolvimento mais recentes desta vertente pode ser demonstrado na tecnologia utilizada em veículos autónomos de sub-superfície (ou Autonomous Underwater Vehicles AUV), veículos autónomos de sub-superfície planadores (ou Autonomous Underwater Gliders AUG) e veículos submarinos não tripulados (ou Unmanned Undersea Vehicles UUV) (Wang et al., 2012).

No desenvolvimento da área da robótica, nomeadamente veículos autónomos de sub-superfície, uma das principais fontes de inspiração é a natureza. Essa inspiração é traduzida em veículos que visam imitar formas de vida aquáticas por forma a incorporar características que melhorem a eficácia do veículo, designados por veículos de sub-superfície biomiméticos, ou Biomimetic Underwater Vehicles (BUV)<sup>1</sup>.

A partir de 1994, com a criação do protótipo *RoboTuna* pelo *Massachusetts Institute of Technology*, e do *TwiddleFish* pela Duke University da Carolina do Norte, o desenvolvimento deste tipo de veículos tem sido cada vez mais frequente.

Devido à capacidade locomotiva e características morfológicas dos peixes (Triantafyllou & Triantafyllou, 1995), estes conseguem sobreviver e executar tarefas complexas em ambientes adversos, e são essas características que se pretende associar a este tipo de veículos. Algumas das vantagens possíveis de se enumerar deste modelo de locomoção alternativo face a veículos com propulsão “tradicional” são:

- Aumento de manobrabilidade;
- Redução dos níveis de ruído;
- Aumento da eficiência energética;
- Aumento da furtividade dos veículos.

Estas vantagens tornam este tipo de veículos muito apelativos para uso militar, com especial interesse na área de Inteligência, Vigilância e Reconhecimento, ou Intelligence, Surveillance and Reconnaissance (ISR). Existindo a possibilidade

---

<sup>1</sup>Dado que o objetivo deste trabalho prende-se com o desenvolvimento de um protótipo de um BUV, utilizaremos esta nomenclatura para nos referirmos a todo o tipo de veículos enunciados ao longo desta dissertação, por motivos de simplificação.

de estes veículos serem autônomos, podem também funcionar como uma alternativa aos navios tripulados, reduzindo custos de operacionalidade e de risco representado da aplicação dos mesmos em cenários de risco.

Tendo em vista a aplicação militar destes veículos, encontra-se em desenvolvimento o projeto SABUVIS II, cujo objetivo é criar um “cardume” de robôs. Esse cardume será constituído por dois tipos de unidades, as unidades controladoras (em menor número e de maior custo) cuja função é controlar e ordenar o restante cardume por forma a executar a tarefa pretendida, e as unidades executantes (em maior número e de menor custo) cuja função é executar as ordens das unidades controladoras, executando diversas tarefas culminando no cumprimento da missão.

Nesta tese pretende-se desenvolver um protótipo das unidades executantes. Dado ser um protótipo inicial, os objetivos funcionais de projeto são bastante simples, pretendendo-se apenas que:

- Seja garantida a estanquidade do veículo;
- O veículo consiga praticar uma profundidade máxima de 10m;
- O veículo seja capaz de navegar autonomamente ou de forma controlada através dum percurso pré-definido;
- Seja garantida uma velocidade de 1m/s;
- Seja possível variar hidrostáticamente a imersão do veículo;
- Seja garantida uma autonomia mínima de 2h;
- Seja garantido um custo reduzido.

Este trabalho visa partir destes requisitos e construir um protótipo aceitável que cumpra com os mesmos, com particular destaque para o dimensionamento e conceção da estrutura mecânica, desenho de um sistema de flutuabilidade que permita variar ativamente a profundidade do veículo, e no projeto do sistema energético e de propulsão do veículo. Por forma a delimitar o trabalho e compreender melhor a linha de ação tomada ao longo deste projeto, a estrutura da dissertação encontra-se organizada por forma a permitir uma leitura organizada e clara do trabalho desenvolvido.

Começa-se pelo Estado da Arte, que dá a conhecer o forte desenvolvimento que a área da robótica em veículos autônomos sub-superfície tem vindo a sofrer. No capítulo seguinte fundamentam-se os requisitos de projeto de uma forma mais formal. Passa-se para os Cálculos Iniciais de projeto, que permitem ter uma ideia das dimensões que o veículo tem de ter para suportar todo o *payload* necessário. Com esta fase concluída, segue-se para a fase de construção, em que se relata todos os passos do processo de construção, assim como os contratempos com que fomos deparados. Por forma a verificar que os requisitos foram ou não cumpridos, procedemos à fase de testes. Os testes realizados encontram-se descritos no capítulo Testes, e o resultado dos mesmos no capítulo que o sucede, Resultados. Termina esta dissertação com o capítulo Conclusões e Trabalho Futuro, em que se faz uma

breve avaliação do grau de satisfação dos requisitos estabelecidos e se indica possíveis direções a tomar no futuro, no sentido de refinar o protótipo e otimizar o mesmo.



# Capítulo 2

## Estado da Arte

É de primordial importância adquirir conhecimento antes de se iniciar um projeto em qualquer área. Rever a literatura existente permite compreender mecanismos previamente aplicados, com e sem sucesso. Em ambos os casos, é possível retirar informação e experiência valiosas, e fazer uma distinção em sistemas que podem ser aplicados, e quais aqueles que não são adequados. Sem acesso a essa informação *à priori*, correríamos o risco de enveredar por opções impraticáveis, que culminariam num gastar de tempo e recursos incorrigível.

Na área da robótica, que tem vindo a conhecer um acentuado desenvolvimento desde a década de 90, vários BUV's têm vindo a ser desenvolvidos, aplicando uma panóplia de sistemas diversos que variam na sua forma (estrutura mecânica), mecanismo de propulsão, sistema de alimentação de energia, sensores e atuadores (*payload*) utilizados. Nos subcapítulos seguintes contextualizar-se-á o projeto SABUVIS II e analisar-se-ão diversos veículos já desenvolvidos, quais as suas diferenças, quais as suas vantagens e desvantagens, e diversidade de aplicações.

### 2.1 Projeto SABUVIS II

O projeto SABUVIS é um projeto de investigação internacional da European Defence Agency (EDA) com o objetivo de desenhar e construir BUV's distintos, com propulsão ondulante silenciosa para utilização em operações ISR. Estes veículos deverão operar em modo autónomo (ou semi-autónomo), e deverão ser equipados com sensores e equipamentos de comunicação, por forma a permitir futuras missões cooperativas em cardume. Este projeto terminou com três protótipos, o BUV1 (Figura 2.1) desenvolvido pela Academia Naval Polaca, o BUV2 (2.2) desenvolvido pela Universidade de Cracóvia e o BUV3 (Figura 2.3) desenvolvido pela EN, FEUP e Oceanscan.



FIGURA 2.1: BUV1 desenvolvido pela Academia Naval Polaca



FIGURA 2.2: BUV2 desenvolvido pela Universidade de Cracóvia



FIGURA 2.3: BUV3 desenvolvido pela EN/FEUP/Oceanscan  
Fonte: Fotografia tirada pelo ASPOF EN-AEL Rocha Araújo

Do projeto SABUVIS I concluiu-se que é possível criar veículos com um grau distinto de correlação às suas contra-partes biológicas, que a propulsão ondulante apresenta um consumo energético inferior relativamente à propulsão convencional (veio e hélice) e que o sinal acústico característico dos BUV apresenta menos ruído que os veículos de propulsão convencional. Estas características validam a ideia de utilizar este tipo de veículos em operações ISR.



Continuando o trabalho desenvolvido no projeto SABUVIS I, o projeto SABUVIS II tem como objetivo<sup>2</sup>:

- a) Desenvolver tecnologia e know-how que permita a uma empresa portuguesa alargar a sua oferta de veículos submarinos para incluir veículos biomiméticos.
- b) Desenvolver técnicas de aprendizagem por reforço para controlar veículos autónomos submarinos.
- c) Desenvolver um simulador de UUV biomimético e ambiente de desenvolvimento para facilitar o desenvolvimento de técnicas de aprendizagem por reforço.
- d) Realizar testes e desenvolver conceitos de operação para veículos biomiméticos.
- e) Dotar as Forças Armadas de um protótipo de um UUV biomimético que possa ser usado operacionalmente.
- f) Identificar mais-valias operacionais deste tipo de sistemas e quais os desenvolvimentos futuros a perseguir.

Dentro do projeto SABUVIS, o projeto SABUVIS II visa elaborar a distinção entre BUV's que constituirão o futuro cardume, dividindo os mesmos em duas categorias: unidades controladoras e unidades executantes. As unidades controladoras serão responsáveis pela navegação, possuindo sensores e equipamentos de comunicações e posicionamento mais desenvolvidos e dispendiosos. As unidades executantes, responsáveis pelo cumprimento de tarefas atribuídas pela unidade controladora mesmo que para tal tenham que ser comprometidas, serão construídas com sensores mais fracos e um orçamento reduzido, por forma a que a sua perda não tenha impacto na realização da missão prevista.

No âmbito do projeto SABUVIS II, o presente trabalho visará desenvolver um protótipo para uma unidade executante.

## 2.2 Sistemas

Nos sub-subcapítulos seguintes será realizada uma exposição de diversas técnicas aplicadas no desenvolvimentos de BUV's, abordando as áreas: isolamento mecânico, tipo de propulsão, sistema de alimentação de energia, e sensores/atuadores (*payload*) utilizados.

Iremos utilizar Raj e Thakur (2016) como bibliografia de referência base para os sub-subcapítulos «2.2.1 Isolamento Mecânico», «2.2.2 Tipos de Propulsão» e «2.2.4 Sensores/Atuadores (*Payload*)», e Wang et al. (2012) para o sub-subcapítulo «2.2.3 Sistemas de Alimentação de Energia».

---

<sup>2</sup>A lista de objetivos apresentada nesta dissertação foi retirado do site da Escola Naval, projetos de investigação, projeto SABUVIS e pode ser consultada em [https://escolanaval.marinha.pt/pt/investigacao\\_web/atividadeinvestigacao\\_web/projetos\\_web/emcurso\\_web/Paginas/SABUVIS.aspx](https://escolanaval.marinha.pt/pt/investigacao_web/atividadeinvestigacao_web/projetos_web/emcurso_web/Paginas/SABUVIS.aspx)

### 2.2.1 Isolamento Mecânico

O isolamento mecânico ou o projeto de um veículo à prova de água são essenciais no desenvolvimento dum BUV, pois vedam e impermeabilizam o mesmo, evitando a entrada de água e garantindo que:

- A massa do veículo não altera, logo a sua manobrabilidade, flutuabilidade e, conseqüentemente, a sua estabilidade não serão afetadas;
- Os componentes eletrônicos não são comprometidos.

Várias abordagens foram tomadas de forma a proceder à impermeabilização dos veículos. As técnicas aplicadas foram:

- Uso de O-rings para vedação (Figura 2.4);

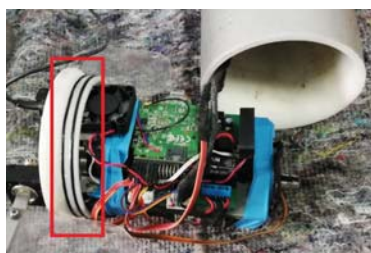


FIGURA 2.4: O-rings Utilizados em Protótipo da Escola Naval Polaca  
- Fotografia autorizada pela equipa de investigação da Escola Naval Polaca

- Uso de servo motores à prova de água (Figura 2.5);

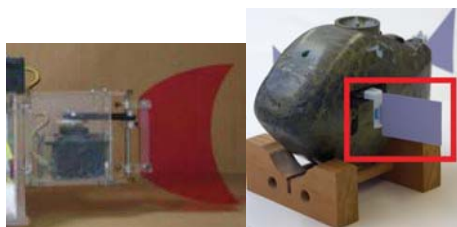


FIGURA 2.5: Servo Motores à Prova de Água

Fonte: Retirado de (Wai Leung Chan et al., 2007) e (Behbahani, Jianxun Wang & Xiaobo Tan, 2013)

- Uso de películas impermeáveis (tereftalato de polietileno TPE, polietileno de baixa densidade PEBD, polietileno linear antiestático de baixa densidade PELABD, plástico emborrachado, revestimento de borracha, revestimento em látex, película à base de sílica, PVC flexível e impermeável, *compliant waterproof skin* como na imagem à direita da figura 2.6, película de gel de sílica como na imagem à direita da figura 2.6 e cobertura de emulsão);



FIGURA 2.6: BUV com Compliant Waterproof Skin (Esquerda) e Película Impermeável de Gel de Sílica (Direita)

Fonte: Retirado de (Marchese, Onal & Rus, 2014) e (Shen et al., 2011),  
respetivamente

- Uso de invólucros para isolar componentes principais e servo motores (Figura 2.7);



FIGURA 2.7: Uso de invólucro para isolar componentes principais  
Fonte: Retirado de (Cen & Erturk, 2013)

- Uso de fixadores de liberação rápida (Figura 2.8).

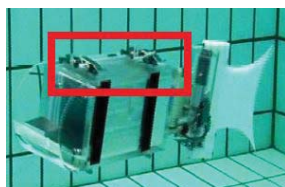


FIGURA 2.8: Fixadores de Liberação Rápida  
Fonte: Retirado de (Low, 2007)

### 2.2.2 Tipo de Propulsão

Iremos proceder à diferenciação de BUV's com base no seu método de locomoção de acordo com(Sfakiotakis, Lane & Davies, 1999).

Segundo este autor, a locomoção aquática dum peixe pode ser, passo a citar: «classificada em duas categorias genéricas com base nas características temporais do seu movimento em:

1) *Natação Periódica (ou constante ou sustentada)*, caracterizada por uma repetição cíclica dos movimentos propulsivos. A natação periódica é empregada pelos peixes para cobrir distâncias relativamente grandes a uma velocidade sensivelmente constante.

2) *Movimentos Transitórios (ou instáveis)* que incluem partidas rápidas, manobras de escape e curvas em «C». Movimentos transitórios duram milissegundos e são normalmente utilizados para capturar presas ou evitar predadores.» Sfakiotakis, Lane e Davies (1999), fim de citação.

Quanto à geração do impulso que os faz mover, os peixes podem ser divididos em propulsão *Body and/or Caudal Fin* (BCF) ou propulsão *Median and/or Paired Fin* (MPF), podendo em cada uma destas propulsões diferenciar-se movimentos ondulatórios (gera-se uma onda que atravessa o corpo ou barbatanas propulsoras, empurrando o fluido para trás, gerando impulso) e oscilatórios (barbatana caudal semi-rígida é oscilada periodicamente, empurrando o fluido para trás, gerando impulso).

Ainda é possível discriminar mais pormenorizadamente a locomoção dos peixes com propulsão BCF (Figura 2.9) com base no tipo de movimento que dá origem ao impulso.

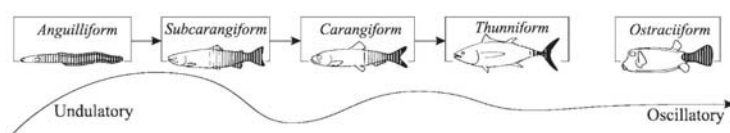


FIGURA 2.9: Locomoção BCF

Fonte: Retirado de Sfakiotakis, Lane e Davies (1999)

Igualmente, é possível discriminar a locomoção dos peixes com propulsão MPF (Figura 2.10) com base no tipo de movimento que dá origem ao impulso e tipo de barbatana utilizada.

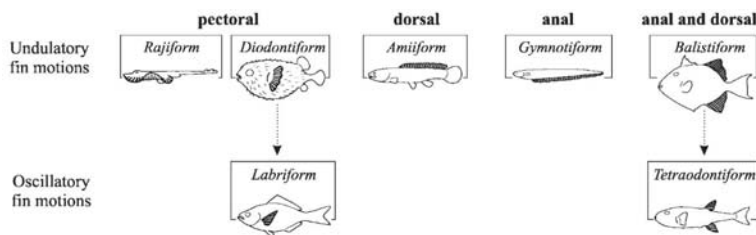


FIGURA 2.10: Locomoção MPF

Fonte: Retirado de Sfakiotakis, Lane e Davies (1999)

Quanto aos veículos de propulsão BCF, pode-se consultar no anexo I.1 um pequeno resumo das vantagens e desvantagens dos diversos tipos de locomoção integrados na propulsão BCF.

Como exemplo de veículos *Anguilliform* (Figura 2.11) temos: AmphiBot II, Biorobotic Lampray, Amphibious Snakelike Robot e a Salamandra Robotica II.

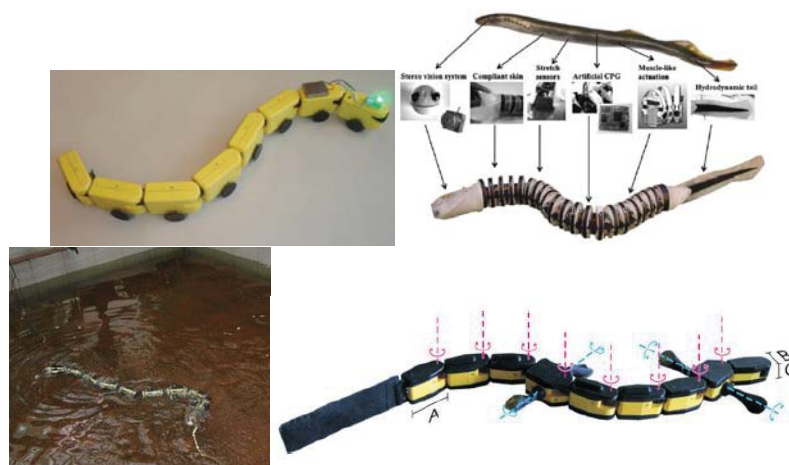


FIGURA 2.11: Exemplos de BUV *Anguilliform* - AmphiBot II (em cima, à esquerda), Biorobotic Lampray (em cima, à direita), Amphibious Snakelike Robot (em baixo, à esquerda) e Salamandra Robotica II (em baixo, à direita)

Fonte: Retirado de (Crespi & Ijspeert, 2008), (Manfredi et al., 2013), (Yu et al., 2009) e (Crespi et al., 2013), respetivamente

Como exemplo de veículos *Subcarangiform/Carangiform* (Figura 2.12) temos: Essex MT 1 Robotic Fish, Essex G9 Robotic Fish, NAF I, SoFi, UC-Ika 1 e Robotic Shark.

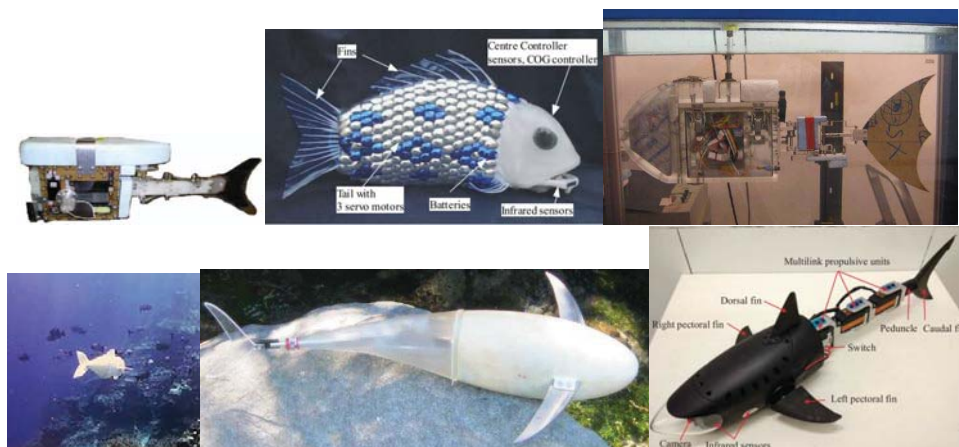


FIGURA 2.12: Exemplos de BUV *Subcarangiform/Carangiform* - Essex MT 1 Robotic Fish (em cima, à esquerda), Essex G9 Robotic Fish (em cima, ao centro), NAF I (em cima, à direita), SoFi (em baixo, à esquerda), UC-Ika 1 (em baixo, ao centro) e Robotic Shark (em baixo, à direita)

Fonte: Retirado de (Jindong Liu, Dukes & Huosheng Hu, 2005), (Hu, 2006), (Low, Chong & Chunlin Zhou, 2010), (Katzschmann et al., 2018), (Farideddin Masoomi et al., 2015) e (Yang, Wu & Yu, 2016), respetivamente

Como exemplo de veículos *Thunniform* (Figura 2.13) temos: Dolphin Robot e RoboTuna.



FIGURA 2.13: Exemplos de BUV *Thunniform* - Dolphin Robot (à esquerda) e RoboTuna (à direita)

Fonte: Retirado de (Liu, Wu & Yu, 2016) e (Triantafyllou & Triantafyllou, 1995), respectivamente

Como exemplo de veículos *Ostraciiform* (Figura 2.14) temos: BoxyBot, MARCO, *Ostraciiform* Fish Robot e Bionic Robotic Fish.



FIGURA 2.14: Exemplos de BUV *Ostraciiform* - Boxybot (em cima, à esquerda), MARCO (em cima, à direita), *Ostraciiform* Fish Robot (em baixo, à esquerda) e Bionic Robotic Fish (em baixo, à direita)

Fonte: Retirado de (Lachat, Crespi & Auke Jan Ijspeert, 2006), (Kodati et al., 2008), (Wai Leung Chan et al., 2007) e (Liu et al., 2014), respectivamente

Quanto aos veículos de propulsão MPF, pode-se consultar no anexo II.1 um pequeno resumo das vantagens e desvantagens dos diversos tipos de locomoção integrados na propulsão MPF.

Como exemplo de veículos *Rajiform* (Figura 2.15) temos: BHRay, Raybot 3.3, Robo-Ray II e Micro Biomimetic Manta Ray Robot Fish.



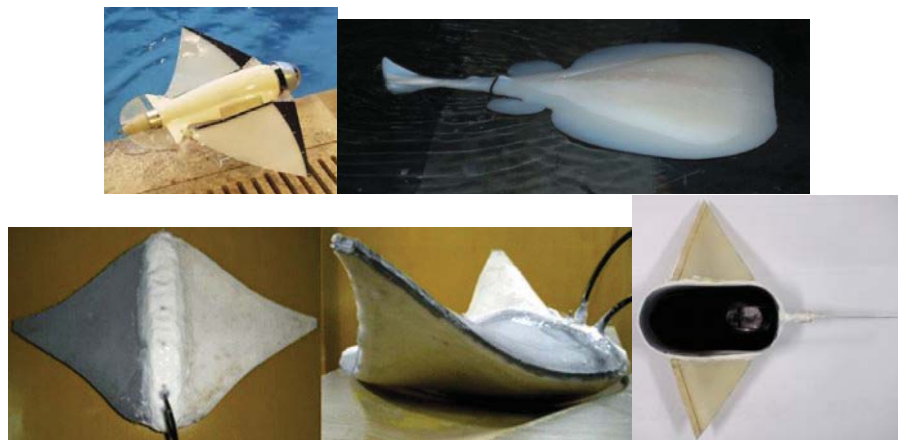


FIGURA 2.15: Exemplos de BUV *Rajiform* - BHRay (em cima, à esquerda), Raybot 3.3 (em cima, à direita), Robo-Ray II (em baixo, à esquerda) e Micro Biomimetic Manta Ray Robot Fish (em baixo, à direita)

Fonte: Retirado de (Gao et al., 2009), (Krishnamurthy et al., 2010), (Cai, Bi & Zheng, 2010) e (Wang et al., 2009), respetivamente

Como exemplo de veículos *Labriform* (Figura 2.16) temos: *Labriform* Fish Robot.



FIGURA 2.16: Exemplos de BUV *Labriform* - *Labriform* Fish Robot

Fonte: Retirado de (Sitorus et al., 2009)

Como exemplo de veículos *Gymnotiform* (Figura 2.17) temos: Knifefish, NKF II e RoboGnilos.

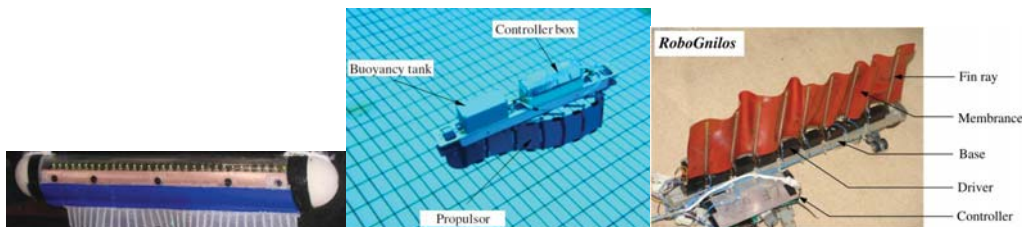


FIGURA 2.17: Exemplos de BUV *Gymnotiform* - Knifefish (à esquerda), NKF II (ao centro) e RoboGnilos (à direita)

Fonte: Retirado de (Curet et al., 2011), (Low, 2011) e (Hu et al., 2009), respetivamente

Como exemplo de veículos *Diodontiform* (Figura 2.18) temos: Autonomous Fin-Actuated Underwater Vehicle.



FIGURA 2.18: Exemplos de BUV *Diodontiform* - Autonomous Fin-Actuated Underwater Vehicle

Fonte: Retirado de (Morgansen, Triplett & Klein, 2007)

Como é possível observar dos diversos exemplos fornecidos, existem várias formas de gerar propulsão num BUV. No âmbito deste projeto, iremos incidir sobre a forma *Subcarangiform/Carangiform* dada a facilidade de construção de veículos com esta forma de propulsão, além de modelos semelhantes apresentarem velocidades próximas da velocidade de projeto apresentada no capítulo seguinte (Sander van den Berg, 2019).

### 2.2.3 Sistema de Alimentação de Energia

De acordo com Wang et al. (2012), existem quatro métodos para garantir a sustentabilidade de operação de um BUV:

- Sistema de *alimentação por cabo* (Figura 2.19);



FIGURA 2.19: Jason/Medea engineering ROV system

Fonte: Retirado de (Wang et al., 2012)

- Uso de *baterias* (Figura 2.20);



FIGURA 2.20: Protótipo do veículo NEMO

Fonte: Retirado de (McGovern et al., 2009)



- *Estações de ancoragem* para recarga de baterias e relé de informação (Figura 2.21);

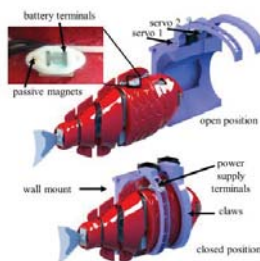


FIGURA 2.21: Estação de carregamento automática para um BUV

Fonte: Retirado de (Phamduy, Cheong & Porfiri, 2016)

- *Conversão de energia* proveniente do ambiente em energia elétrica (Figura 2.22).

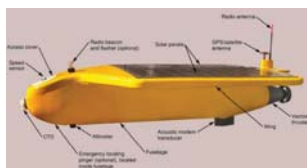


FIGURA 2.22: AUSI SAUV-II

Fonte: Retirado de (Wang et al., 2012)

O sistema de *alimentação por cabos* (Figura 2.23) consiste em ligar um sistema móvel (ex.:BUV) a uma fonte de energia externa (ex.:navio) através de um cabo de alimentação, que também pode integrar um cabo de comunicação.

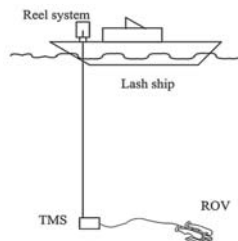


FIGURA 2.23: Sistema de *alimentação por cabo*

Fonte: Retirado de (Wang et al., 2012)

Este método permite que o sistema móvel seja continuamente alimentado e esteja continuamente a fornecer/receber informação da fonte externa. Isso possibilita uma autonomia no tempo prolongada em comparação a outros métodos de alimentação e uma atualização contínua de informação ou de execução de comandos, o que torna a sua aplicação mais simples e precisa.

Contudo, este método apresenta duas grandes desvantagens:

Uma delas é a necessidade de incorporação de um sistema de recolha de cabo por forma a não enredar o sistema móvel, e recolhê-lo aquando necessário. Torna-se então necessário controlar a quantidade de cabo de alimentação a fornecer/recolher, implicando a integração de uma unidade de gestão de cabo (Tether Management System TMS), o que implica custos adicionais e constrangimentos de projeto.

A outra desvantagem prende-se com o facto da existência de um cabo de alimentação limitar a autonomia em distância do sistema móvel ao comprimento do mesmo.

Na Tabela 2.1 encontra-se um quadro-resumo das vantagens e desvantagens do sistema de *alimentação por cabo*.

TABELA 2.1: Quadro-resumo do sistema de *alimentação por cabo*

VANTAGENS	DESVANTAGENS
Autonomia ilimitada no tempo	Autonomia limitada em distância
Continuidade do <i>feedback</i> de informação entre sistema móvel/fonte de alimentação externa	Aumento do custo do projeto e constrangimentos na construção do mesmo

De acordo com Wang et al. (2012), o uso de *baterias* além de fornecer uma elevada densidade energética, apresenta invólucros de pequenas dimensões, permitindo a sua aplicação em aparelhos doméstico, industriais e na investigação científica. De acordo com a reação química e ciclo de vida, as baterias podem ser classificadas em:

1) Baterias primárias. A reação química que ocorre no interior das baterias é irreversível. Estas baterias são desenhadas para serem usadas uma vez e depois descartadas, sem possibilidade de serem novamente carregadas (ex.: baterias alcalinas e baterias primárias de lítio).

2) Baterias secundárias. A reação química que ocorre no interior das baterias é reversível. Estas baterias podem ser recarregadas e usadas várias vezes (ex.: baterias de chumbo-ácido, baterias de prata-zinco, baterias Ni-Cad e baterias de iões ou polímeros de lítio): as baterias de chumbo-ácido são as mais antigas, são usadas de forma diversa e são de fácil operação, contudo apresentam grandes dimensões e peso; as baterias de prata-zinco possuem grande densidade energética, mas são caras e apresentam curtos ciclos de vida; as baterias Ni-Cad são bastante utilizadas em aplicações com correntes elevadas, são baratas e de fácil aquisição, contudo são as mais pesadas; as baterias de iões de lítio (Li-Ion) ou polímeros de lítio (LiPo) tem elevada densidade energética e apresentam dimensões reduzidas, contudo são caras

e o seu carregamento tem que ser feito de forma cuidada, por forma a evitar o risco de incêndio.

Existem também outros tipos de baterias, como as fuel cells e as semi fuel cells. Uma fuel cell (ex.: células de combustível de ácido fosfórico PAFC, de carbonato fundido MCFC, de óxido sólido SOFC, de eletrólito de polímero PEFC e de membrana de troca de prótons PEMFC) é uma célula eletroquímica que converte energia de oxigénio e combustível em energia elétrica. Caracterizam-se por apresentarem alta eficiência energética, reduzido impacto ambiental e não libertarem gases para a atmosfera. Semi fuel cell são outro tipo de células que utilizam ligas de metais, cátodos aéreos e um eletrólito para uma reação que fornece densidades energéticas muito superiores.

Em comparação ao sistema de alimentação por cabos, o uso de baterias é mais simples, mais silencioso, mais barato e possivelmente mais leve (dependendo do peso do TMS, e se este se encontra no sistema móvel ou na fonte energética).

Na Tabela 2.2 encontra-se um quadro-resumo das vantagens e desvantagens da utilização de *baterias*.

TABELA 2.2: Quadro-resumo do uso de *baterias*

VANTAGENS	DESVANTAGENS
Simplicidade de uso	Ciclo de vida mais curto
Simplicidade de projeto	Autonomia limitada no tempo
Mais silencioso	Algumas baterias libertam gases inflamáveis com o tempo
Mais barato	Algumas baterias correm o risco de queimar se não forem carregadas devidamente
Possibilidade de ser mais leve	

As *estações de ancoragem* para recarga de baterias e relé de informação funcionam como um complemento a BUV's alimentados por baterias. Dado que a autonomia destes veículos é de apenas algumas horas, para executar uma missão de longa duração (dias, meses ou até anos) torna-se necessário desenvolver métodos para recarregar os mesmos. Visto que a ancoragem dos BUV's para carregamento de baterias tem que ser autónoma (caso contrário os veículos deixam de ser verdadeiramente autónomos), desenvolveram-se *estações de ancoragem* que permitem, para além do carregamento de baterias, manutenções simples do sistema e troca de informação entre o veículo e a estação, permitindo a atualização de objetivos de missão, ou descarga de informação do veículo para a estação.

Por forma a tornar sustentável a operação destas estações, a hipótese das mesmas serem alimentadas através da energia das ondas tem vindo a ser desenvolvida (Figura 2.24).

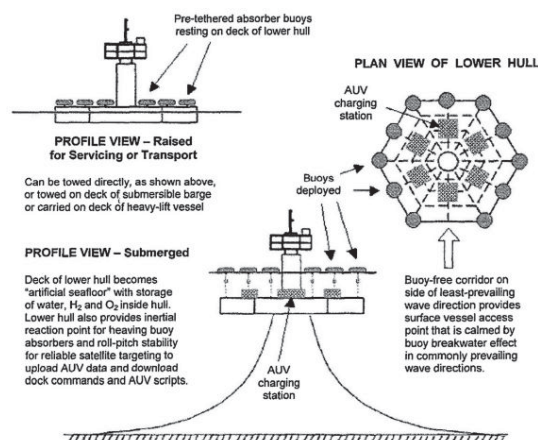


FIGURA 2.24: Estações de Ancoragem Ondomotriz

Fonte: Retirado de (Wang et al., 2012)

A *conversão de energia* proveniente do ambiente, seja ela solar, térmica ou ondomotriz, em energia elétrica é uma forma de alimentação de veículos alternativa mais recente. Pela enorme disponibilidade de energia existente, associado ao facto de esta obtenção energética ser feita de forma sustentável, sem implicações para o meio ambiente, torna este sistema de alimentação bastante apelativo. Contudo, ainda é uma tecnologia muito recente, e o rendimento atual do processo (10-25% de rendimento na conversão de energia solar em energia elétrica, de acordo com Wang et al. (2012)) é demasiado baixo. Isto leva à utilização de sistemas de grandes dimensões por forma a compensar, o que torna este sistema inviável de utilizar neste projeto.

Na Tabela 2.3 encontra-se um quadro-resumo das vantagens e desvantagens do sistema de *conversão de energia* ambiental em energia elétrica.

TABELA 2.3: Quadro-resumo do método de *conversão de energia*

VANTAGENS	DESVANTAGENS
Disponível grandes quantidade de energia gratuita	Baixo rendimento de conversão
Produção energética sustentável	Sistemas de grandes dimensões
Sem impacto para o meio ambiente	Quantidade de energia disponível varia com as condições climáticas e época do ano

### 2.2.4 Sensores/Atuadores (*Payload*)

Para se orientarem, navegarem e obterem informação do meio ambiente, de forma a escapar predadores e caçar presas, os peixes desenvolveram órgãos sensoriais. Estes órgãos garantem funções sensoriais como visão, audição, detecção de fluxo e pressão de água, recepção química e elétrica.

Numa tentativa de imitar esses órgãos e incorporar essas funções em BUV's são utilizados diversos sensores, com acréscimo de sensores para odometria e posicionamento (inexistentes nos peixes).

Na Tabela 2.4 estão resumidos os sensores utilizados para imitar cada função sensorial, e as suas aplicações nos BUV's.

TABELA 2.4: Sensores utilizados nos BUV

FUNÇÃO SENSORIAL	SENSOR UTILIZADO	APLICAÇÃO NOS BUV'S
Visão	Câmaras CMOS e CCD	Deteção de obstáculos e localização
Audição	SONAR, sensor de proximidade ultrassónico e sensor de alcance ultrassom	Deteção de obstáculos
Deteção de fluxo e pressão de água	Sensor de água, sensor de pressão, sensor de profundidade e sensor de fugas	Determinação de pressão e fluxo de água
Recepção química	<i>não utilizados em BUV's</i>	<i>não utilizados em BUV's</i>
Recepção elétrica	Matriz de elétrodos	Localização e deteção de obstáculos

TABELA 2.4: Sensores utilizados nos BUV

FUNÇÃO SENSORIAL	SENSOR UTILIZADO	APLICAÇÃO NOS BUV'S
Odometria	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sensor de alongamento</li> <li>• SMA</li> <li>• IPMC</li> <li>• Inclínometro</li> <li>• Giroscópio</li> <li>• Acelerômetro</li> <li>• Câmara CCD</li> <li>• Sensor de rumo</li> <li>• Girobússola</li> <li>• Sensor de proximidade</li> <li>• Sensor de junta posição</li> <li>• Potenciômetro</li> <li>• IMU</li> <li>• Sensor de triangulação a laser</li> <li>• Câmara</li> </ul>	Odometria
Posicionamento	Sensor de infra-vermelhos, GPS, sensor de posicionamento e sensor de navegação	Localização

Fonte: Adaptado de (Raj & Thakur, 2016)

Cada sensor tem as suas vantagens e desvantagens, contudo, dado que esta dissertação se debruça sobre o desenvolvimento da plataforma, não abordaremos este tema em profundidade.

Os atuadores são responsáveis pela transformação de energia elétrica, química ou térmica acumulada no BUV em energia mecânica. De acordo com Raj e Thakur (2016), são utilizados maioritariamente cinco tipos de atuadores na construção de BUV's, nomeadamente, servo-motores, ligas com memória de forma (Shape Memory Alloys SMA), polímero eletroativo (Electroactive Polymer EAP), atuadores piezoelétricos e atuadores magnéticos, cada um com as suas vantagens e desvantagens, que serão de seguida enunciados.

Servo-motores são motores DC (Direct Current) convencionais que incorporam um sensor para obter *feedback* da posição do atuador (Figura 2.25)<sup>3</sup>. Estes atuadores garantem uma gama variada de velocidades e elevada manobrabilidade, contudo a massa específica e o consumo energético dos mesmos são elevados.



FIGURA 2.25: Exemplo Servo-motor

Fonte: Imagem retirada do site do fornecedor DoBitAoByte

De acordo com Kim (2008), as SMA (Figura 2.26) são ligas que memorizam a forma que adquirem durante um aquecimento a elevadas temperaturas. Após memorizarem essa forma, podem ser deformadas de forma plástica até um certo limite, adquirindo a forma inicial quando aquecidas a baixas temperaturas. Estes atuadores apresentam baixos valores de massa específica e consumo energético, contudo a sua velocidade e manobrabilidade são bastante limitadas.



FIGURA 2.26: Ligas com memória de forma

Fonte: Retirado de (Kim, 2008)

Os EAP (Figura 2.27) são polímeros que tensionam sob o efeito de corrente elétrica. De acordo com o seu mecanismo de atuação podem ser classificados em EAP's eletrônicos, acionados por campo elétrico ou forças de Coulomb, e EAP's iónicos, que mudam de forma devido à passagem de iões (para uma leitura mais detalhada sobre este tipo de atuadores, consultar (Nakabo, Mukai & Asaka, 2007)). Estes atuadores, à semelhança das SMA, apresentam baixos valores de massa específica e consumo energética e a sua velocidade e manobrabilidade são bastante limitadas quando comparados com os servo-motores.

---

<sup>3</sup>O site do fornecedor DoBitAoByte pode ser consultado no site <https://www.dobitaobyte.com.br/control-de-servo-motor-com-pic/>

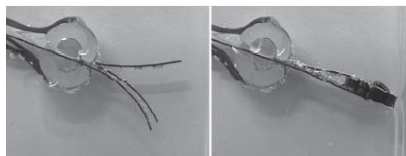


FIGURA 2.27: Atuador EAP

Fonte: Retirado de (Nakabo, Mukai & Asaka, 2007)

Os atuadores piezoelétricos podem ser divididos em piezocerâmicos e compostos de macro fibra (Macro Fiber Composites MFC).

A atuação dos piezocerâmicos é conseguida através do efeito piezoelétrico, que é a capacidade de gerar uma carga elétrica quando é aplicada uma tensão mecânica sobre o atuador (e vice-versa).

Os MFC foram desenvolvidos pela NASA (Williams & Inman, 2002) e consistem numa película de poli-imida que incorpora fibras piezocerâmicas retangulares e um padrão de elétrodos interdigitado, conferindo mais flexibilidade, melhor resposta ao impacto e maior tensão mecânica quando sujeito a uma carga elétrica.

Estes atuadores permitem velocidades elevadas, mantendo os valores de massa específica e consumo energético baixos, contudo, ainda não foram realizados testes conclusivos quanto à mobilidade dos mesmos.

Os atuadores magnéticos (Figura 2.28), como o próprio nome indica, utilizam ímãs para gerar movimento. À semelhança dos atuadores piezoelétricos, apresentam velocidades elevadas, valores de massa específica e consumo energético baixos, se o ímã se encontrar externo ao veículo (consultar (Liu et al., 2010)). É de esperar que, se o ímã tiver que ser introduzido no interior do BUV, o veículo fique mais pesado, e a sua velocidade seja limitada.

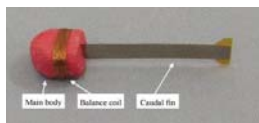


FIGURA 2.28: Atuador Magnético

Fonte: Retirado de (Liu et al., 2010)

Raj e Thakur (2016) apresentam uma tabela (Tabela 2.5) para comparar em termos práticos cada um dos atuadores (onde BL é «body length of robot», KGPA é «kg per actuator», Wpa é «Watt per actuator», Whpa é «Watt-hour per actuator», A é «*Anguilliform* locomotion», S é «*Subcarangiform* locomotion», C é «*Carangiform* locomotion», O é «*Ostraciiform* locomotion», R é «*Rajiform* locomotion», G é «*Gymnotiform* locomotion», D é «*Diodontiform* locomotion» e M é «miscellaneous robots»).



TABELA 2.5: Comparação dos diversos Atuadores

ATUADORES	VELOCIDADE (BL/s)	MANOBRABILIDADE (BL)	MASSA ESPECÍFICA (KGPA)	CONSUMO ENERGÉTICO (Wpa OU Whpa)
Servo-motores	0.1-0.288 (A)	0.008-0.5 (A)	0.2-1 (A)	0.8 Wpa (A)
	0.11-0.7 (S)	0.7 (S)	0.03-0.6 (S)	6.48 Wpa (A)
	0.1-11.6 (C)	0.18-0.8 (C)	0.17-100 (C)	3.4 Wpa-28
	0.08-3.65 (O)	0-1.1 (O)	0.007-0.5 (O)	Wpa (C)
	0.04-0.3 (R)		0.004-1.2 (R)	24.3 Whpa (C)
			0.7 (G)	120 Wh (C)
			0.2 (D)	80 Wpa (R)
SMA				0.0004 Wpa (R)
	0.1 (C)	0.03 (C)	0.7 (C)	0.4 Wpa (C)
	0.2 (S)	0.03 (S)	0.2 (S)	8.3 Whpa (S)
EAP	0.12 (R)		0.5 (R)	
	0.00145	0.6 (M)	0.03 (C)	0.5 Wpa (C)
	0.17 (C)	1.1 (M)	0.7 (M)	1.3 Wpa (R)
	0.0038 (R)	0.8 (M)	0.1 (M)	1 Wpa (M)
	0.085 (M)		0.06 (M)	1.3 ×
	0.00505 (M)		0.1 (M)	10 <sup>-4</sup> Wpa
	0.015 (M)		0.2 (M)	(M)
	0.0162 (M)		0.4 (M)	0.3 Wpa (M)
Piezoelétricos	0.003 (M)			4.3 × 10 <sup>-6</sup>
				Wpa (M)
				2 × 10 <sup>-4</sup>
Magnéticos				Wpa (M)
				4.6 × 10 <sup>-4</sup>
				Wpa (M)
Piezoelétricos	2.9 (S)	-	0.015 (S)	0.1 Wpa (S)
	0.08 (O)		0.085 (O)	4.1 × 10 <sup>-5</sup>
	2.2 (M)		0.3 (M)	Wpa (O)
Magnéticos	3.65 (O)	-	0.0007 (O)	-
	0.09 (R)		0.006 (R)	
	0.03 (O)			

Fonte: Adaptado de (Raj &amp; Thakur, 2016)

## 2.3 Aplicações

O desenvolvimento de BUV's tem em vista as principais aplicações: exploração dos fundos oceânicos e da vida marinha neles presentes (Leonard & Graver, 2001); análise de condição de infraestruturas em meio marítimo; recolha de amostras (Cui, Li & Yan, 2016); exploração arqueológica submarina (Allotta et al., 2015); combate à poluição (Cruz & Matos, 2008); monitorização oceânica (Pieterkosky, Cavanaugh & Thompson, 2017); reforço de segurança em portos (Conry et al., 2013); educação na área da robótica (Phamduy, Legrand & Porfiri, 2015); investigação científica (Kopman & Porfiri, 2013); atividades de ISR (projeto SABUVIS e GhostSwimmer).

## Capítulo 3

# Requisitos e Conceito Inicial

A necessidade de executar uma determinada tarefa ou de cumprir um certo objetivo são a gênese de qualquer projeto que leva ao desenvolvimento duma máquina ou mecanismo. Para executar a função para a qual foram desenhadas, essas máquinas terão que cumprir com certos requisitos ou parâmetros, podendo-se dizer que esses requisitos derivam do objetivo do projeto, e são o ponto inicial (porque todo o conceito, desenho e desenvolvimento tem em vista cumprir os requisitos de projeto) e final do mesmo (porque assim que um protótipo cumprir com todos os requisitos, pode-se considerar como um mecanismo final funcional, apto a cumprir com a tarefa para o qual foi desenhado). Para além disso, os requisitos podem servir como parâmetros funcionais de avaliação de satisfação de projeto, na parte experimental deste.

Pelo exposto anteriormente, torna-se imperativo definir de forma formal os requisitos que se pretendem cumprir com o trabalho a ser desenvolvido, antes de procedermos ao desenvolvimento do mesmo. Estes requisitos serão traçados tendo em conta que este trabalho se encontra inserido no projeto SABUVIS, e que o objetivo principal é desenvolver um protótipo funcional de uma unidade executante do mesmo.

### 3.1 Requisitos

Neste subcapítulo procederemos à definição formal de requisitos de projeto. Tendo em conta que este é o primeiro protótipo a ser desenvolvido deste tipo de unidades, queremos garantir a funcionalidade do mesmo sendo que a otimização dos seus parâmetros de funcionamento será encarado como possível trabalho futuro.

Como qualquer BUV, a forma do veículo terá que se aproximar à sua contraparte biológica e, dado ser um veículo sub-aquático, terá que ser garantida a estancuidade do mesmo.

Por forma a reduzir os custos de projeto, a profundidade a ser alcançada por este protótipo não será excessiva. Além disso, prevendo que se irá realizar uma quantidade extensa de testes a este protótipo com vista a adquirir dados sobre o seu funcionamento, não é de grande interesse que o veículo opere a profundidades muito grandes, o que dificultaria recuperar o mesmo no caso de ocorrer algum imprevisto

que deixasse o veículo inoperacional. Assim sendo, 10m de profundidade parece ser um valor de projeto adequado para o nosso veículo.

Incidindo num período extenso de testes, a autonomia do veículo também deverá permitir o funcionamento contínuo do mesmo num período de tempo adequado à duração dos testes, por forma a não interromper a aquisição de dados para trocar baterias ou carregá-las. Não esperando testes com uma duração superior a 1h, uma autonomia de 2h será adequada para este protótipo.

Dado tratar-se de um veículo autónomo, é necessário que o veículo seja capaz de navegar autonomamente ou de forma controlada através dum percurso pré-definido. A sua velocidade máxima deverá ser, no mínimo, de 1m/s, de forma a ser praticável a sua aplicação em teatro operacional. Além disso, por forma a diversificar a manobrabilidade do veículo, este deve ser capaz de variar a sua imersão hidrostáticamente.

Partindo do pressuposto que este tipo de unidades serão «dispensáveis» em teatro operacional, garantir que cada unidade tenha o custo mais reduzido possível é imperativo ao longo de todo o desenho e construção do veículo. Para conseguir tal objetivo terá de se recorrer, ao máximo, a materiais e componentes «off-the-shelf».

Para um protótipo inicial deste tipo de unidades, os requisitos previamente estabelecidos parecem-nos ser suficientes. Na tabela 3.1 encontram-se resumidos os objetivos de projeto formalmente estabelecidos neste subcapítulo.

TABELA 3.1: Quadro-Resumo de Objetivos de Projeto

1)	A forma do veículo se aproxime à sua contra-parte biológica
2)	Seja garantida a estanquidade do veículo
3)	O veículo consiga praticar uma profundidade máxima de 10m
4)	O veículo seja capaz de navegar autonomamente ou de forma controlada através dum percurso pré-definido
5)	Seja garantida uma velocidade de 1m/s
6)	Seja possível variar hidrostáticamente a imersão do veículo
7)	Seja garantida uma autonomia mínima de 2h
8)	Seja garantido um custo reduzido

## 3.2 Conceito Inicial

Neste subcapítulo procede-se à descrição das ideias iniciais para o desenvolvimento do desenho do protótipo. Pretende-se transmitir apenas uma imagem da forma idealizada para o veículo, assim como alguns sub-sistemas que se pretendem desenvolver, antes de se proceder com o projeto detalhado dos sistemas que constituirão o veículo (esse projeto mais detalhado será abordado no capítulo seguinte).

À semelhança do BUV3 do projeto SABUVIS, desenvolver-se-á um veículo com uma parte cilíndrica central, onde serão alojados a grande maioria dos componentes do veículo.

Para apresentar uma morfologia semelhante à de um peixe, a propulsão será ondulante, fazendo uso de uma instalação propulsora em forma de cauda, semelhante a outros veículos. Dada a velocidade obtida pelo veículo desenvolvido por Sander van den Berg (2019) de 0.7m/s, utilizaremos uma topologia semelhante, designadamente, *Carangiforme* (cauda com 1/3 do comprimento total do veículo). Numa fase inicial, iremos assumir uma cauda com dois graus de liberdade (serão utilizados dois servo-motores), dado que um grau poderia não ser suficiente, e três ou mais graus implicaria uma complexidade eletrónica e mecânica que não justifica o eventual ganho hidrodinâmico e verossimilhança à sua contra-parte biológica. Além disso, uma instalação propulsora mais extensa e complexa arrisca um acréscimo de peso numa parte terminal e móvel do veículo, o que pode levar a um excesso de caimento a ré e movimentos desnecessários da cauda. Torna-se necessário escolher uma material flexível e impermeável para cobrir a cauda e assegurar a estanquidade do sistema (tema abordado no capítulo seguinte).

Ainda no sentido de atribuir autenticidade à forma, serão incorporadas duas barbatanas peitorais e uma barbatana dorsal. As barbatanas peitorais serão movidas por um servo-motor cada, e serão responsáveis por auxiliar a manobrabilidade do veículo e atenuar o cabeceio e balanço do mesmo. A barbatana dorsal permanecerá estática, e conferirá alojamento a todas as antenas necessárias aos sub-sistemas de comunicação do veículo, à semelhança do BUV3.

Uma das características deste veículo é possuir uma câmara para captação de imagens e, visto ter uma função semelhante à dos olhos, será colocada na parte frontal do veículo. Para tal, será necessário criar uma cobertura que garanta a sua segurança e a impermeabilize da água do meio exterior, mas que não impeça a captação de imagem (essa cobertura terá que ser transparente).

Um veículo submarino necessita de um sistema de controlo de imersão/emersão. Num veículo convencional, este controlo é feito através de barbatanas laterais que, devido ao seguimento do navio, geram um impulso ascendente semelhante a uma aeronave. Contudo, neste veículo, esse sistema será interno ao mesmo e será constituído por duas seringas e dois motores passo-a-passo. Os motores passo-a-passo atuarão nas seringas movendo o batente que se encontra no seu interior, fazendo variar a quantidade de líquido nas mesmas. Dado que os motores passo-a-passo podem ser controlados minuciosamente é possível desenvolver um algoritmo que, mediante uma calibração inicial usando a graduação existente nas seringas, permita controlar com exatidão a quantidade de fluido presente nas mesmas. Variando a quantidade de líquido no interior do veículo, consegue-se variar o volume deslocado pelo mesmo, aumentando ou reduzindo a sua reserva de flutuabilidade, o que varia a impulsão resultante que culmina no controlo da profundidade de operação do veículo, sem para tal ser necessário este encontrar-se em movimento. Desta forma, este sistema conseguirá, em teoria, alterar ativamente a flutuabilidade do navio sem seguimento, pelo qual será batizado de tanques de flutuabilidade em vez dos usualmente designados tanques de lastro. Outra vantagem deste sistema prende-se com o facto do líquido no interior do veículo encher completamente o espaço no qual está confinado, evitando a existência de espelhos líquidos no interior do veículo, tornando-o mais estável.

A existência de sensores que têm que estar em contacto permanente com a água (ex.: sensor de pressão para estimar a profundidade do veículo e eco-sonda para detetar obstáculos que se encontrem no caminho do mesmo) implica a criação de uma plataforma de suporte para os mesmos, com uma vedação que garanta a estanquidade da estrutura. Adicionalmente, a eco-sonda tem que se localizar numa posição que permita a captação de ecos sem interferência, logo nenhuma parte do veículo lhe deve ser obstáculo. Por forma a manter a autenticidade biológica do veículo, esta estrutura de suporte de sensores assumirá a forma de uma barbatana pélvica.

O dimensionamento e escolha de baterias tem um grande impacto no projeto do veículo. Tendo em conta a limitação de espaço e a quantidade de energia necessária à operação do BUV, a utilização de baterias de lítio (Li-Ion ou LiPo) face a outro tipo de baterias torna-se preferencial neste projeto (dadas as suas características, como foi explicado no capítulo anterior). Dentro destas baterias, as de Li-Ion têm maior capacidade energética a um preço mais baixo, mas sofrem de uma descarga gradual que piora com o tempo e apresentam um risco de incêndio superior às de Li-Po, que embora sejam mais seguras e não apresentem a descarga gradual das baterias Li-Ion, são mais caras, têm menor capacidade energética e um ciclo de vida mais curto. Neste projeto, visto que o risco de incêndio das baterias poderia comprometer todo o veículo, optou-se pelo uso de baterias Li-Po em vez das Li-Ion.

Um ponto chave no desenho do veículo trata-se da incorporação de conectores elétricos no mesmo, carregar as baterias que alimentam os seus sistemas proceder à troca de informação e ordens ou até mesmo programação do veículo, sem envolver um processo de desmontagem moroso e desnecessário. No capítulo seguinte será abordada a possibilidade de integração dos mesmos nas barbatana pélvica ou dorsal.

A última consideração a ser realizada neste abordagem inicial aborda os conversores e drivers necessários à regulação e alimentação elétrica dos diversos sistemas do veículo. Embora estes sejam adquiridos facilmente e de forma pouco dispendiosa no mercado, a sua incorporação no veículo terá que ser desenvolvida. No capítulo seguinte discutir-se-á a possibilidade de criação de estruturas de suporte recorrendo à tecnologia de impressão 3D que, para além do seu reduzido custo de manufatura permite criar peças detalhadas rapidamente e sem esforço acrescido.

Com todas as considerações iniciais, elaborou-se um modelo 3D daquilo que será o trabalho desenvolvido (Figura 3.1). Este veículo constitui uma base para um sistema autónomo inovador biomimético, com capacidade de alteração de certos módulos que permitam transformar e otimizar o mesmo para diversos teatros de operação. Com esta descrição em mente, batizamos o veículo de TOBIAS (Transformable and Optimizable Biomimetic Innovative Autonomous System).

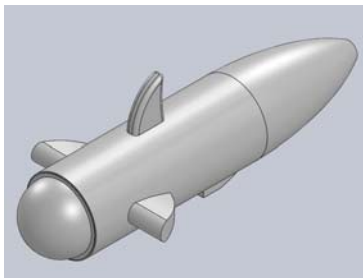


FIGURA 3.1: TOBIAS

Fonte: Imagem retirada do desenho inicial do protótipo elaborado em *SolidWorks*

Terminamos este capítulo com a consciencialização de que, dado este veículo ser o primeiro protótipo deste projeto, não existem garantias de cumprimento de alguns requisitos operacionais: Visto que o consumo energético apenas pode ser estimado de forma pouco precisa, a autonomia do sistema pode ficar aquém do desejado; a velocidade máxima está dependente do ângulo de movimentação da cauda e da sua frequência, assim como do grau hidrodinâmico da forma do veículo, análises complexas, que não são o tema desta dissertação, pelo que, neste trabalho, não há forma de assegurar que o requisito de velocidade seja efetivamente cumprido.





# Capítulo 4

## Desenvolvimento

Neste capítulo serão abordados diversos pormenores do desenvolvimento dos conceitos referidos no sub-capítulo 3.2. Discutir-se-ão os cálculos realizados como estimativas iniciais de projeto, e os aspetos desenvolvidos no desenrolar do mesmo para os diversos sub-sistemas que constituem o veículo. Dado que muito do trabalho desta dissertação passou pelo desenho da plataforma de forma a integrar os diversos sub-sistemas no veículo, os detalhes das peças desenhadas serão abordados de forma mais aprofundada, sendo que os desenhos técnicos das mesmas podem ser consultados em apêndices.

### 4.1 Atuadores, Sensores e Eletrónica

Neste subcapítulo iremos abordar as escolhas dos atuadores, sensores e eletrónica de potência para o veículo. Antes de procedermos a uma breve introdução aos componentes selecionados, iremos justificar a escolha dos mesmos.

#### 4.1.1 Motores Propulsores

Os servo-motores<sup>4</sup> selecionados para uso na instalação propulsora são os JX BLS-12V7146 (Figura 4.1)<sup>5</sup>. Será utilizado um servo em cada um dos segmentos da cauda e um por barbatana lateral do veículo, num total de quatro servos.

---

<sup>4</sup>Daqui em diante, servo-motor ou servo-motores serão referidos como «servo» ou «servos», respetivamente.

<sup>5</sup>

O servo-motor JX BLS-12V7146 e as suas características podem ser consultados no site <https://www.banggood.com/JX-BLS-12V7146-46KG-12V-180-Degrees-HV-Steel-Gear-Digital-Brushless-Servo-For-RC-Robot-p-1180609.html>



FIGURA 4.1: Servo-motor JX BLS-12V7146  
Fonte: Imagem retirada do site do fabricante Banggood

As características destes servos podem ser consultadas no anexo III.1. O baixo custo e peso do servo associado à velocidade de operação aceitável e elevado binário (46 kg-cm relativamente aos 2~24 kg-cm), assim como o facto de ser à prova de água tornam-no num servo muito apelativo com vista à aplicação pretendida.

Devido à falta de um critério adequado de seleção para estes motores, optou-se pelo uso de servos com características idênticas às daqueles utilizados no BUV3 do projeto SABUVIS. Visto que o controlo destes motores é feito através de uma placa Arduino, será necessário integrar a mesma no protótipo. A ideia será recorrer à tecnologia de impressão 3D para imprimir uma plataforma em filamento de políácido láctico (PLA) para suportar a placa Arduino.

#### 4.1.2 Motores Passo-a-passo

Para seleccionar os motores a utilizar nos tanques de flutuabilidade, é necessário calcular que força estes terão que exercer. Dado que

$$P = P_0 + \rho \times g \times h, \quad (4.1)$$

onde  $P$  é a pressão,  $P_0$  é a pressão atmosférica,  $\rho$  é a densidade da água,  $g$  é a aceleração gravítica e  $h$  é a profundidade.

Assumindo a profundidade de projeto de 10m, a pressão que os motores terão que vencer é de  $P = 201.843kPa = 29.28psi$ . Esta pressão será exercida no batente da seringa que constitui o tanque.

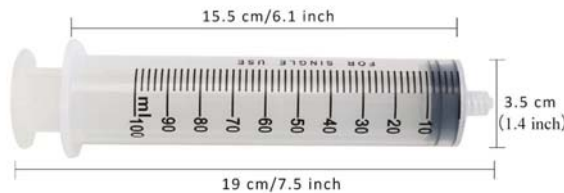


FIGURA 4.2: Dimensões das Seringas que constituem os Tanques de Flutuabilidade

Fonte: Retirado do catálogo do fornecedor

Dadas as dimensões da seringa (Figura 4.2), podemos calcular a área do batente com o valor do diâmetro através da fórmula:

$$A_{Bat} = \frac{\pi \times D^2}{4}, \quad (4.2)$$

onde  $A_{Bat}$  é a área de superfície do batente da seringa e  $D_{Bat}$  é o seu diâmetro. Com um diâmetro de  $D_{Bat} = 3.5cm$ , obtemos uma área de  $A_{Bat} = 9.62cm^2$ . A força que o motor terá que exercer é dada pela fórmula:

$$F_{passo-a-passo} = P \times A_{Bat}, \quad (4.3)$$

onde  $F_{passo-a-passo}$  é a força a exercer pelo motor,  $P$  é a pressão e  $A_{Bat}$  é a área de superfície do batente da seringa. Com os valores de  $P$  e  $A_{Bat}$  calculados anteriormente, obtém-se  $F_{pass-a-passo} = 194.2N \simeq 200N$ .

Uma forma expedita de verificar se um motor é adequado à aplicação pretendida é verificar se a sua curva de *performance* engloba o valor de força pretendido.

Na figura 4.3 encontra-se representada a curva de *performance* do motor NANOTEC modelo LA421L13-A-TJCA (Figura 4.4)<sup>6</sup>. Como se pode observar, este motor consegue movimentar uma carga de  $F = 200N$  a uma velocidade de  $v = 15mm/s$ . Com esta velocidade, e atendendo ao comprimento das seringas, será possível encher ou vaziar completamente os tanques em cerca de dez segundos. Para uma primeira iteração, um tempo de dez segundos para iniciar manobras de imersão ou emersão é aceitável.

É ainda possível calcular a potência necessária ao motor através da fórmula:

$$P_{stepper} = F_{passo-a-passo} \times V_{passo-a-passo}, \quad (4.4)$$

onde  $V_{passo-a-passo}$  é a velocidade com que este desloca o êmbolo. Com os valores de  $F = 200N$  e  $v = 15mm/s$ , obtém-se  $P_{stepper} = 3W$ .

---

6

O motor passo-a-passo NANOTEC LA421L13-A-TJCA e a sua curva de performance podem ser consultados no site <https://en.nanotec.com/products/2411-la421l13-a-tjca/>

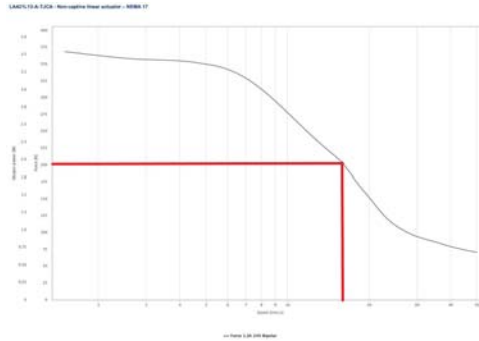


FIGURA 4.3: Curva de Performance do motor NANOTEC LA421L13-A-TJCA

Fonte: Retirado do site do fabricante NANOTEC



FIGURA 4.4: Motor Passo-a-Passo LA421L13-A-TJCA

Fonte: Imagem retirada do site do fabricante NANOTEC

O controlo destes motores é feito através de um driver adicional e, à semelhança das placa de arduino, será necessário integrar a mesma no protótipo através de uma estrutura de suporte em PLA.

### 4.1.3 Sensores e Eletrónica

Os sensores a serem utilizados neste protótipo foram selecionados pelo camarada ASPOF EN-AEL Rocha Araújo. Dado que a área relativa ao comando e controlo do veículo se encontra inserido no tema da dissertação do camarada, a aquisição de informação pertinente na tomada da decisão, e, portanto, a seleção de sensores, é da sua responsabilidade. As razões que levaram à escolha dos sensores utilizados podem ser consultadas na dissertação do mesmo, sendo que para o presente trabalho, apenas interessa referenciar quais os sensores utilizados, que podem ser consultados na Figura 4.5. Para além dos sensores a serem utilizados, as suas propriedades de massa e volume são necessárias para projetar a sua localização a bordo, assim como a corrente, tensão e potência elétrica de forma a permitir o dimensionamento das baterias necessárias, e projetar a distribuição de energia pelo veículo.

	<i>Tensão de Alimentação</i>	<i>Corrente de Alimentação</i>	<i>Potência de Alimentação</i>
<i>Jetson Nano</i>	5V	2.5A	5 – 10W
<i>Arduino UNO</i>	7 – 12V	80mA	1W
<i>Módulo SIM800L</i>	5V	1A	5W
<i>WiFi Bullet2HP</i>	5 – 24V PoE	3A	8W
<i>Bar30 Depht/Pressure Sensor</i>	2.5 – 5V	1.25mA	6.25mW
<i>AHRS VN-100T</i>	5V	44mA	220mW
<i>U-Blox NEO-7M</i>	3.5 – 5V	3mA	15mW
<i>Ping Sonar Altimeter and Echosounder</i>	5V	100mA	500mW
<i>SOS Leak Sensor</i>	3.5 – 5V	20mA	100mW
<i>Ping360 Scanning Imaging Sonar</i>	11 – 25V	0.2A	5W
<i>ArduCam 8 MP Sony IMX219</i>	5V	0.4A	2W

FIGURA 4.5: Sensores Utilizados

Fonte: Figura retirada da dissertação do camarada ASPOF EN-AEL Rocha Araújo

#### 4.1.4 Baterias

Atendendo à intenção de uso de baterias LiPo que são compostas por células associadas em paralelo (para aumentar a capacidade) e em série (para aumentar a tensão), dado que a tensão nominal de cada célula é de 3.7V, a tensão da bateria resultante depende do número de células (uma célula para 3.7V, duas células para 7.4V, três células para 11.1V, quatro células para 14.8V, etc.). Verificando a tensão que é necessário fornecer aos servos (Figura III.1), motores passo-a-passo (Figura 4.3) e sensores (Figura 4.5), a bateria deverá ter uma tensão de  $V_{baterias} = 14,8V$  pois é a tensão mínima que as baterias podem ter que permite alimentar os servos de 12V e restante eletrônica. Dado que a restante eletrônica utiliza valores de tensão inferiores, serão necessários conversores e drivers para alimentar a mesma.

Para calcular a capacidade da bateria, é necessário calcular a potência total a fornecer, e o tempo previsto de autonomia. Passaremos a calcular a potência necessária:

$$P_{servos} = n_{servos}^0 \times V_{servos} \times A_{servos} = 4 \times 12 \times 2 = 96W, \quad (4.5)$$

onde  $P_{servos}$  é a potência dos servos,  $n_{servos}^0$  é o número de servos utilizados,  $V_{servos}$  é a tensão dos servos,  $A_{servos}$  é a corrente dos servos. Dado que a corrente nominal dos servos utilizados não é referida nas suas características no

site do fornecedor, utilizou-se como valor de referência a corrente nominal de servos semelhantes<sup>7</sup>.

$$P_{stepper} = n_{stepper}^0 \times P_{nom-stepper} = 2 \times 3 = 6W, \quad (4.6)$$

onde  $P_{stepper}$  é a potência dos motores passo-a-passo,  $n_{stepper}^0$  é o número de motores passo-a-passo utilizados,  $P_{nom-stepper}$  é a potência necessária para um motor passo-a-passo operar à profundidade de projeto. Para operar a essa profundidade, calculou-se anteriormente que o motor tem que exercer uma força de 200N. Da figura 4.3 retira-se que a potência necessária é de 2W, mas por forma a garantir uma margem conservadora de segurança, assumiu-se que a potência necessária seria de 3W.

$$P_{sensores} = \sum(P_{cada-sensor}) \approx 31.9W \quad (4.7)$$

, onde  $P_{sensores}$  é a potência total dos sensores utilizados,  $P_{cada-sensor}$  é a potência de cada sensor utilizado. Estes valores podem ser consultados na coluna mais à direita da figura 4.5.

A potência total  $P_{total}$  é a soma de todas as potências mais as perdas nos conservadores e drivers. Assumindo um valor conservador de 10W para as perdas  $P_{perdas}$  :

$$P_{total} = P_{servos} + P_{stepper} + P_{sensores} + P_{perdas} \simeq 143.9W \quad (4.8)$$

A energia total  $E_{total}$  necessária para as baterias, para uma autonomia pretendida  $n_{horas}^0$  de duas horas, pode ser calculada pela fórmula:

$$E_{total} = P_{total} \times n_{horas}^0 = 143.9 \times 2 = 287.8Wh \quad (4.9)$$

A capacidade necessária das baterias  $C_{baterias}$  é dada pela fórmula:

$$C_{baterias} = \frac{E_{total}}{V_{baterias}} \approx 19,45Ah \quad (4.10)$$

Utilizando as baterias TATTU (Figura 4.6)<sup>8</sup>, cuja capacidade é de  $C_{TATTU} = 16Ah$  , é possível calcular o número de baterias necessárias  $N_{bat-nec}^0$  :

<sup>7</sup>Os servos Mclellan são semelhantes aos utilizados neste projeto e as suas características podem ser consultados no site <http://www.farnell.com/datasheets/526515.pdf>

<sup>8</sup>

As baterias Lipo TATTU 16000mAh 14.8V 15/30C 4S1P podem ser consultados no site [https://www.hpmodelismo.com/pt/lipo/5160-bateria-lipo-gens-ace-15c-148v-16000mah-4s1p.html?search\\_query=14.8V&results=28](https://www.hpmodelismo.com/pt/lipo/5160-bateria-lipo-gens-ace-15c-148v-16000mah-4s1p.html?search_query=14.8V&results=28)

$$N^o_{bat-nec} = \frac{C_{baterias}}{C_{TATTU}} \approx 1.22 \Rightarrow N^o_{bat-nec} = 2 \quad (4.11)$$



FIGURA 4.6: Baterias Lipo TATTU 16000mAh 14.8V 15/30C 4S1P  
Fonte: Retirado do site do distribuidor HP Modelismo

Utilizaremos o LAUV elaborado pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto(Sousa et al., 2012) como referência de autonomia. Este veículo tem baterias com uma capacidade energética de 546Wh e, a uma velocidade média de 1.4m/s, garante uma autonomia de 6h a 8h. Para compararmos com as baterias TATTU, temos que determinar a capacidade energética  $E_{TATTU}$  destas através da fórmula:

$$E_{TATTU} = C_{TATTU} \times V_{baterias} \times N^o_{bat-nec} = 473.6Wh \quad (4.12)$$

Assumindo a velocidade de projeto de 1m/s, é de esperar que estas baterias garantam a autonomia pretendida de 2h, mesmo tendo em conta a propulsão ondulante do protótipo (que não será a mais eficiente tratando-se da primeira iteração deste protótipo), dada a grande margem de capacidade energética das baterias.

## 4.2 Estrutura Mecânica

Neste subcapítulo iremos abordar as diversas escolhas efetuadas no desenho da estrutura do protótipo. Dado se tratar de um veículo modular, abordaremos cada secção individualmente, começando pela parte central, seguida da parte frontal e terminando com a parte de ré, onde se encontra focado o sistema de propulsão alternativo.

### 4.2.1 Cilindro Central, Discos Estruturais e Varões de Suportes

Numa fase inicial do projeto foi elaborada uma folha de cálculo Excel (Apêndice A.1) com base na forma especulada para o protótipo, e utilizando fórmulas básicas de formas aproximadas de cada parte do veículo, desenvolveu-se uma calculadora de volume deslocado e massa do protótipo, tendo como dados de entrada o comprimento da parte central, o seu diâmetro externo e a sua espessura. Através da experimentação de diversas combinações de valores dos dados de entrada, e com

base nos requisitos de forma de projeto, chegamos aos seguintes valores: comprimento inicial de 500mm, diâmetro exterior da parte central de 185mm e espessura de 1mm.

Com base nas dimensões iniciais, desenvolvemos a restante estrutura do veículo, o que se revelou como uma aproximação inadequada. Dado que não existia nenhum tubo em aço inox manufaturado industrialmente com essas dimensões (impeditivo para o projeto, pois um tubo feito por encomenda seria muito caro, não cumprindo com os requisitos de projeto), estas dimensões tornavam-se inviáveis. Recorreu-se a um fornecedor de tubos de aço inox que, para além de indicar os diâmetros disponíveis no mercado (Anexo IV.1)<sup>9</sup> apontou para a dificuldade de maquinar tubos de espessura tão reduzida. Com esta informação, selecionou-se um novo diâmetro para o projeto, nomeadamente, de 204mm e uma espessura de 2mm.

Para evitar uma situação semelhante de se repetir devido aos O-rings utilizados na vedação da parte central, visto que também têm que ser utilizados uns que sejam produzidos industrialmente de forma a reduzir o custo de produção, utilizou-se uma calculadora online<sup>10</sup> para verificar quais as dimensões e o material mais adequado para os O-rings. Para uma vedação eficaz, o diâmetro interno deverá ser de 192mm com uma espessura de 2mm (Anexo V.1), e os O-rings devem ser de borracha de nitrilo-butadieno (Nitrile-Butadiene Rubber). Após confirmar que existiam O-rings desse material e com essas dimensões no mercado, prosseguiu-se com o desenvolvimento da estrutura do veículo.

O cilindro central culminou com um diâmetro externo de 204mm, espessura de 2mm e comprimento de 500mm em aço inox AISI 304 (Figura 4.7). Para além das oito furações ISO M6 separadas de 45° entre si tanto na parte anterior<sup>11</sup> como posterior do veículo para fixação dos discos estruturais, realçam-se as duas furações laterais de 40mm onde assentam os bucins das barbatanas peitorais, as furações ISO M6 no topo para fixação da pega do tubo e rasgo para passagem da barbatana dorsal, e furações ISO M6 e rasgo no fundo do tubo para passagem da cablagem do sensor de pressão, eco-sonda e tubos dos tanques de fluatuabilidade.

---

<sup>9</sup>Os tubos de aço disponibilizados pela empresa metais MFS podem ser consultados no site [http://www.fms.pt/pt/aco\\_inoxidavel/tubos/tubo\\_redondo\\_de\\_aco\\_inoxidavel.html](http://www.fms.pt/pt/aco_inoxidavel/tubos/tubo_redondo_de_aco_inoxidavel.html)

<sup>10</sup>A calculadora de O-rings desenvolvida pela empresa ERIKS pode ser consultada e utilizada através do site <https://oringcalculator.eriksgroup.com/>

<sup>11</sup>Nesta dissertação, a designação de parte «anterior» refere-se à parte mais AV e a parte «posterior» refere-se à parte mais AR de uma determinada peça.





FIGURA 4.7: Cilindro Central

Fonte: Imagem retirada do desenho da peça em *SolidWorks*

O cilindro central é complementado pela pega que se une na parte superior do tubo (Figura 4.8) e pela base do sensor de pressão, eco-sonda e tubos dos tanques de flutuabilidade, na parte inferior (Figura 4.9).

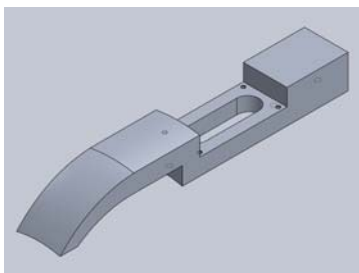


FIGURA 4.8: Pega do Cilindro Central

Fonte: Imagem retirada do desenho da peça em *SolidWorks*

A pega do cilindro central tem três furações ISO M6 com rosca na parte inferior para fixação ao cilindro central através de parafusos com esse diâmetro. Dado que esses furos não atravessam a pega na totalidade, para garantir a estanquidade desta junção basta vedar a superfície de contacto entre pega e cilindro, conseguido através da utilização de uma junta de borracha. A pega também apresenta um rasgo para passagem da barbatana dorsal que vai acomodar as diversas antenas utilizadas no veículo. Esse rasgo localiza-se na parte superior e é acompanhado de quatro furações ISO M4 com rosca para fixação da barbatana dorsal, que será discutido mais detalhadamente num sub-subcapítulo seguinte. Por último, existe uma furação de 10mm na parte posterior, para suporte de um conector de carregamento das baterias.

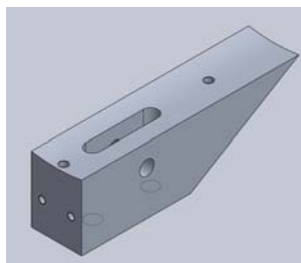


FIGURA 4.9: Base dos Sensores do Cilindro Central  
 Fonte: Imagem retirada do desenho da peça em *SolidWorks*

A base do sensor de pressão, eco-sonda e tubos dos tanques de flutuabilidade tem como função suportar a eco-sonda, o sensor de pressão e os tubos de enchimento/vazamento dos tanques de flutuabilidade. Dado que todos estes têm que estar em contacto permanente com a água, a melhor opção é alocá-los na parte inferior do veículo que assegura este contacto, mesmo que o veículo esteja à tona de água. Esta peça tem duas furações ISO M6 com rosca na parte adjacente ao tubo para fixação ao mesmo, duas furações ISO M5 com rosca avante para fixação do suporte da eco-sonda, um rasgo com 40mm de comprimento no topo com conexão à cobertura central para passagem de cablagem, duas furações de 10mm, uma na face de bombordo e outra na face de estibordo para passagem dos tubos dos tanques de flutuabilidade.

O desenho da forma da base de sensores é destinado a dar-lhe uma aparência o mais semelhante possível a uma barbatana pélvica. Sendo que não se esperam elevados níveis de tensões a serem aplicados nela, a escolha de forma prende-se simplesmente com uma questão estética.

Para a produção destas peças, dado o elevado nível de detalhe das mesmas, têm que ser produzidas recorrendo a tecnologia de controlo numérico computacional (Computer Numerical Control CNC) e, para tal, recorreu-se a uma empresa particular externa, nomeadamente a WEERG. Esta empresa garante a maquinaria das peças e envio das mesmas. Contudo, a variedade de materiais que conseguem trabalhar é reduzida. Visto que ambas as peças serão dedicadas ao suporte da barbatana dorsal e sensores, respetivamente, não se prevê que sejam submetidas a esforços elevados, nomeadamente de flexão ou torção. Assim sendo, seleccionou-se a liga de alumínio 5052-H32 disponibilizada pela WEERG para fabrico das suas peças devido à sua facilidade de maquinaria e baixa densidade.

A cobertura central é fechada avante (AV) e a ré (AR) com discos estruturais, por forma a criar um compartimento central estanque com vista a acomodar as baterias, tanques de flutuabilidade, mecanismo impulsor das barbatanas peitorais, eletrónica de potência, sensores, antenas e cablagem, culminando no compartimento principal do veículo.

O disco estrutural AR (Figura 4.10) para além de se ligar à cobertura central, também se liga à cobertura traseira. Dai apresentar um total de dezasseis furações ISO M6 com rosca (oito para aparafusar a cobertura central e oito para

a cobertura traseira), como se pode ver na imagem da esquerda da figura 4.10. Nessa mesma imagem, podem-se observar quatro entalhes em torno de todo o disco, destinados a alojar os O-rings que garantem a estanquidade da estrutura tanto na cobertura central como na cobertura traseira. Na imagem central da mesma figura, podem-se observar quatro furações ISO M8 com rosca dispostas em retângulo, destinadas aos varões roscados que atravessam o veículo na extensão da cobertura central. Finalizando com a imagem à direita dessa mesma figura, podem-se observar quatro furações ISO M8 com rosca dispostas em cruz, para fixar a base anterior do servomotor da instalação propulsora (discutida em pormenor mais à frente). O último detalhe a analisar são as quatro furações de 30mm de diâmetro que atravessam o disco, que servem para passagem de cablagem e como forma de reduzir a massa do veículo.

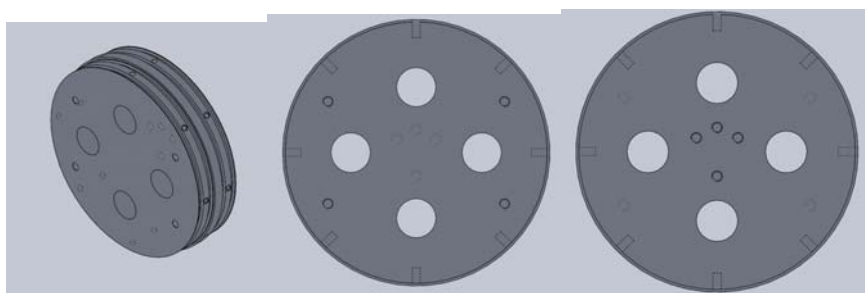


FIGURA 4.10: Disco Estrutural AR Vista Isométrica (Esquerda), Anterior (Centro) e Posterior (Direita)  
Fonte: Imagem retirada do desenho da peça em *SolidWorks*

O disco estrutural AV apresenta um total de três versões diferentes, que foram surgindo de diversos constrangimentos de projeto. A primeira versão, que pode ser observada na figura 4.11, é muito semelhante ao disco estrutural AR, apresentando as mesmos dezasseis furações ISO M6 com rosca para fixação da cobertura frontal e cobertura central, os mesmos quatro entalhes em torno do disco para alojamento dos O-rings e as mesmas quatro furações de 30mm para passagem de cablagem e redução de peso. As únicas diferenças entre estes discos são as furações ISO M3 com rosca na parte anterior (imagem central da figura 4.11) destinadas à fixação da ArduCam 8 MP Sony IMX 219 e as furações ISO M8 sem rosca na parte posterior do disco (imagem da direita da figura 4.11) onde assentam os varões roscados (se estas furações fossem roscadas, quando os varões roscados estivessem em posição simultaneamente nos discos AV e AR, poderiam causar o desalinhamento dos mesmos, inviabilizando o projeto).

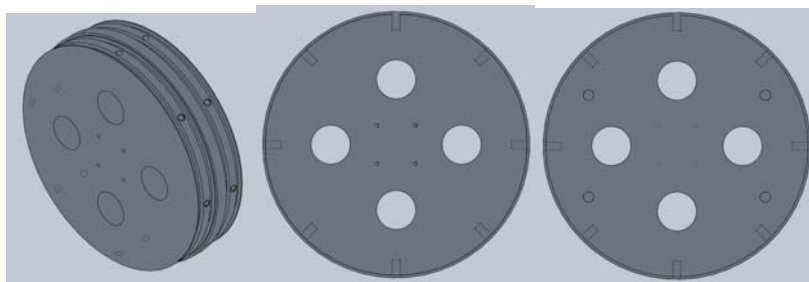


FIGURA 4.11: Disco Estrutural AV V1 Vista Isométrica (Esquerda), Anterior (Centro) e Posterior (Direita)

Fonte: Imagem retirada do desenho da peça em *SolidWorks*

Devido à incapacidade de produção de uma cobertura frontal de acordo com o seu desenho original, prosseguiu-se para uma nova versão do disco estrutural AV. Nesta segunda versão (Figura 4.12), com vista à aplicação de um domo de acrílico pré-fabricado pela BlueRobotics (Figura 4.16), procedeu-se com alterações significativas. Visto que as dimensões da nova cobertura eram bastante inferiores à anterior, a fixação na mesma posição seria impossível, o que torna as oito furações ISO M6 com rosca em torno do disco e a aplicação de O-rings na parte anterior dos discos desnecessárias, tendo-se eliminado por completo as zonas onde estas se encontravam, resultando num disco com uma espessura mais reduzida e mais leve (imagem à esquerda da figura 4.12). Por forma a capitalizar de forma mais eficiente o espaço livre do disco, as furações ISO M3 com rosca para suporte da ArduCam 8 MP Sony IMX 219 foram elevadas (imagem central da figura 4.12), e as furações para passagem de cablagem foram também elevadas e reduzidas para um diâmetro de 20mm, por forma a serem englobadas pelo domo. Na parte anterior do disco também foram realizadas seis furações ISO M4x0,7 com rosca para fixação do domo e duas furações ISO M5 com rosca para fixação do suporte da eco-sonda.

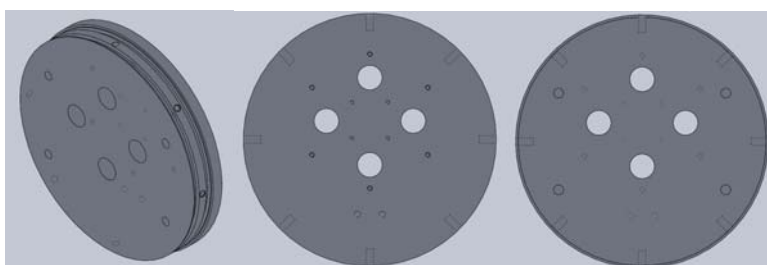


FIGURA 4.12: Disco Estrutural AV V2 Vista Isométrica (Esquerda), Anterior (Centro) e Posterior (Direita)

Fonte: Imagem retirada do desenho da peça em *SolidWorks*

Destas modificações resultou um veículo menos hidrodinâmico e esteticamente pouco apelativo, que levou a uma nova iteração da cobertura frontal e, consequentemente, uma nova versão do disco estrutural AV (Figura 4.13). À semelhança da segunda versão, a cobertura frontal é fixada na parte anterior do disco, não

havendo necessidade das furações radiais ISO M6 com rosca para fixação e entalhes para O-rings. As furações para fixação da ArduCam 8 MP Sony IMX 219 e passagem de cablagem são idênticas às da primeira versão. Na parte anterior do disco (imagem central da figura 4.13), existem oito furações ISO M4 com rosca para fixação da nova cobertura frontal.

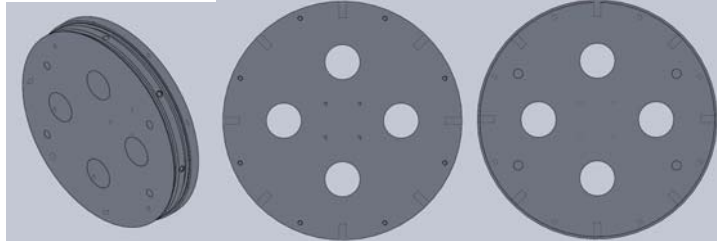


FIGURA 4.13: Disco Estrutural AV V3 Vista Isométrica (Esquerda), Anterior (Centro) e Posterior (Direita)

Fonte: Imagem retirada do desenho da peça em *SolidWorks*

Numa primeira iteração, onde se considerava que o diâmetro externo da cobertura central seria de 185mm e a sua espessura seria de 1mm, o veículo foi desenhado com três varões roscados de 6mm para servirem de reforço à flexão e torção da estrutura. Contudo, devido à adoção das novas medidas do diâmetro e espessura da cobertura frontal, substituiu-se o varão de 6mm por um de 8mm, por forma a dar mais robustez ao protótipo. O uso de três varões (imagem à esquerda da figura 4.14) demonstrou-se como um problema, dado o espaçamento de 120° entre eles, o varão do topo passava exatamente sobre o rasgo na parte superior da cobertura central, o que impedia a passagem das antenas. A solução achada para este problema passou por desenhar uma barbatana dorsal com altura suficiente para alojar as antenas, sendo que o espaço existente entre o varão e o rasgo era destinada somente à passagem de cablagem. Embora funcional, a barbatana resultante era demasiado alta (com cerca de 20cm de altura), o que tornava o veículo desproporcional e esteticamente pouco apelativo. Face a este novo problema, decidiu-se utilizar quatro varões roscados de 8mm, dispostos em torno do centro da cobertura central (imagem à direita da figura 4.14). Desta forma nenhum varão passava no rasgo superior da cobertura central, o que permitia capitalizar melhor o espaço e reduzir a altura da barbatana dorsal, dando-lhe uma forma mais apelativa.

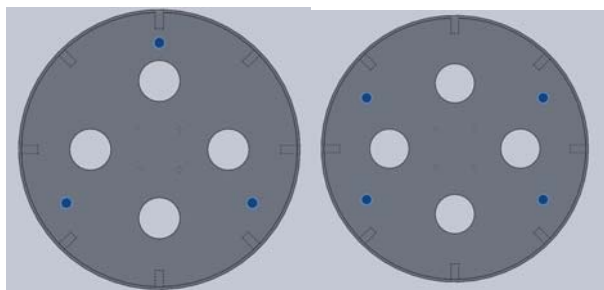


FIGURA 4.14: Disposição dos Varões Estruturais Inicial (Esquerda) e Final (Direita)

Fonte: Imagem retirada do desenho da peça em *SolidWorks*

### 4.2.2 Cobertura Frontal

A cobertura frontal tem como função o alojamento da câmara ArduCam 8 MP Sony IMX 219, e como o objetivo é a aquisição de imagem em tempo real, o material desta cobertura tem que ser transparente e resistente, por forma a garantir a proteção da câmara e a integridade da condição de estanquidade. Tendo em consideração estas características, e tendo em conta a mentalidade de reduzir o orçamento das unidades, selecionou-se como material acrílico perspex.

Numa primeira iteração, a cobertura frontal foi desenhada como uma campânula, apresentando oito furações ISO M6 para fixação ao disco estrutural AV (imagem à esquerda na figura 4.15). Contudo, industrialmente não são fabricadas campânulas de acrílico. Assim sendo, redesenhou-se esta cobertura e prosseguiu-se para uma nova iteração. Na imagem à direita da figura 4.15 pode-se ver como seria a fixação da primeira versão da cobertura frontal e do disco estrutural AV.

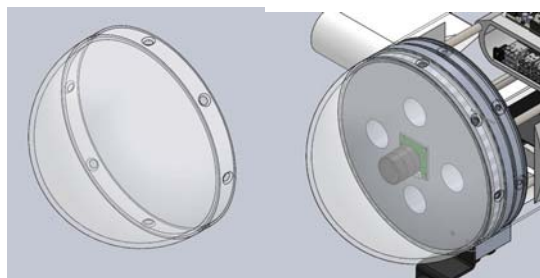


FIGURA 4.15: Cobertura Frontal V1 (à esquerda) e União ao Disco Estrutural AV V1 (à direita)

Fonte: Imagem retirada do desenho da peça em *SolidWorks*

Numa segunda iteração, abordou-se a hipótese da utilização de um domo de acrílico pré-fabricado pela BlueRobotics (imagem à esquerda na figura 4.16)<sup>12</sup>.

<sup>12</sup>

O domo fabricado pela BlueRobotics pode ser consultados no site <https://bluerobotics.com/store/watertight-enclosures/4-series/wte4-p-dome-r4-rp/>

O modo de fixação era diferente, sendo que os O-rings do disco estrutural AV não seriam necessários, contudo tornava-se necessário efetuar seis furações ISO M3x12 na face anterior do mesmo, levando a uma segunda versão destes discos. Na imagem à direita na figura 4.16 pode-se ver como seria a fixação da segunda versão da cobertura frontal e do disco estrutural AV.

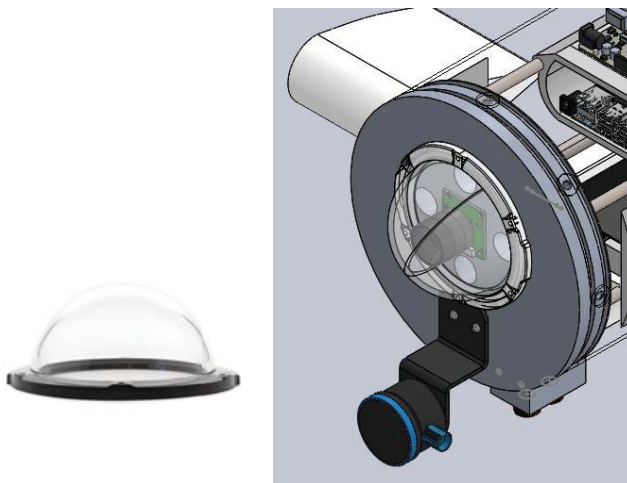


FIGURA 4.16: BlueRobotics Dome End Cap (à esquerda) e União ao Disco Estrutural AV V2 (à direita)

Fonte: Imagem retirada do site do fornecedor BlueRobotics e do desenho da peça em *SolidWorks*, respectivamente

Devido à redução hidrodinâmica do veículo com a segunda versão da cobertura frontal e do visual pouco apelativo resultante da aplicação desta, optou-se por projetar uma terceira iteração. Nesta versão, manteve-se a forma de domo acompanhado por uma flange com furações para fixação idêntica à versão anterior, mas aumentou-se o diâmetro interno da mesma (imagem à esquerda na figura 4.17) para 176mm. A flange tem 8mm de largura e altura de 2mm, com oito furações de 4mm a 94,5mm do centro do domo e espaçadas de 45° entre si. Devido à fragilidade que o acrílico apresenta, o aperto necessário aos parafusos de modo a garantir a estanquidade poderiam partir o mesmo nas zonas de furação. Isto levou ao desenho e construção de uma guarda protetora em alumínio, com vista a assentar na flange do domo e distribuir a pressão exercida pelo aperto dos parafusos por toda a sua área (imagem central na figura 4.17). Na imagem à direita na figura 4.17 pode-se observar como será a fixação da terceira versão da cobertura frontal e do disco estrutural AV.





FIGURA 4.17: Cobertura Frontal V3 (à esquerda), Guarda da Cobertura (no centro) e União ao Disco Estrutural AV V3 (à direita)

Fonte: Imagem retirada do desenho da peça em *SolidWorks*

### 4.2.3 Cobertura Traseira/Cauda

A cobertura traseira ou cauda do veículo (imagem à esquerda da figura 4.18), terá que ser flexível e ainda assim garantir a condição de estanquidade. Com base no trabalho desenvolvido por Marchese, Onal e Rus (2014), será utilizado uma borracha de silicone para esta parte do veículo. O material a utilizar serão as borrachas Ecoflex 00-30, que são silicones catalisados por platina, misturados numa proporção de volume ou peso de 1:1, com um tempo de cura de 4 horas à temperatura ambiente, seguido de uma cura de 2 horas a 80°C e finalmente de 1 hora a 100°C. O molde externo (imagem central da figura 4.18) e interno (imagem à direita da figura 4.18) da cobertura traseira serão impressos em PLA. Em seguida, aplica-se a mistura Ecoflex nesses moldes, procede-se à cura dos mesmos, e em seguida removem-se os moldes, ficando a cobertura traseira. Para finalizar, procede-se à furação de oito furos ISO M6 para fixação ao disco estrutural AR.

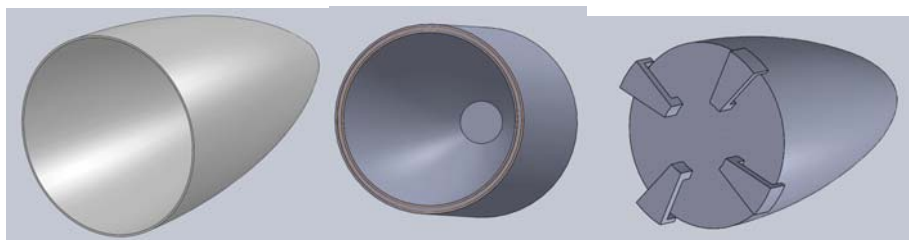


FIGURA 4.18: Cobertura Traseira (Esquerda) e Respetivos Moldes Externo (Centro) e Interno (Direita)

Fonte: Imagem retirada do desenho da peça em *SolidWorks*

### 4.2.4 Barbatanas Peitorais

O mecanismo das barbatanas peitorais é composto por dois bucins (imagem à esquerda na figura 4.19) impressos em PLA, dois servos e dois veios com três entalhes cada para O-rings (imagem à direita na figura 4.19). Utilizou-se novamente a calculadora para O-rings e obtiveram-se as dimensões que podem ser consultadas no anexo VI.1 (O-rings em NBR, diâmetro interno de 7mm e espessura de 2mm).



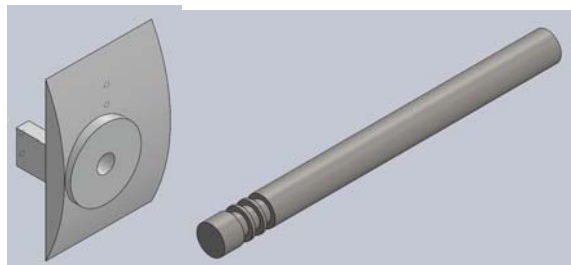


FIGURA 4.19: Bucim das Barbatanas Laterais (à esquerda) e Respetivos Veios (à direita)

Fonte: Imagem retirada do desenho da peça em *SolidWorks*

O bucim será colado à cobertura central através de cola industrial, e possui dois alicerces com furações ISO M2 com rosca para fixação dos servos. O varão é seguro por um conector específico ao servo, sendo que os O-rings ficam alocados no interior da passagem do veio pelo bucim. As barbatanas peitorais são coladas aos veios, resultando no mecanismo que se pode observar na figura 4.20. A forma apresentada não corresponde ao desenho desejado para as barbatanas, mas dado o impacto que a forma, material e detalhes da superfície destas barbatanas têm no escoamento de fluído através delas, deixaremos a otimização de forma e escolha de materiais para um trabalho futuro mais detalhado. Para o presente trabalho, será utilizada a mesma estratégia que foi utilizada no projeto SABUVIS I, que passa pela adaptação de barbatanas de mergulho comuns para o efeito (Figura 4.21).

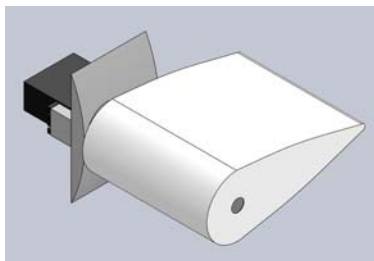


FIGURA 4.20: Mecanismo das Barbatanas Laterais

Fonte: Imagem retirada do desenho da peça em *SolidWorks*



FIGURA 4.21: Adaptação de Barbatanas de Mergulho no BUUV2

### 4.2.5 Barbatana Dorsal

A barbatana dorsal tem como finalidade alojar as antenas utilizadas nos sistemas de comunicação do veículo. Numa primeira iteração, devido ao constrangimento previamente apontado do posicionamento de um dos varões estruturais, a barbatana foi desenhada por forma à totalidade das antenas estarem alojadas no interior da mesma (imagem à esquerda da figura 4.22). Esta primeira versão apresentava uma forma pouco apelativa, e a sua altura de 175mm tornavam-na desproporcional ao resto do veículo, o que levou ao rearranjo dos varões estruturais e desenvolvimento de uma nova versão da barbatana dorsal, com uma altura de 110mm (imagem à direita da figura 4.22) e uma forma mais apelativa.

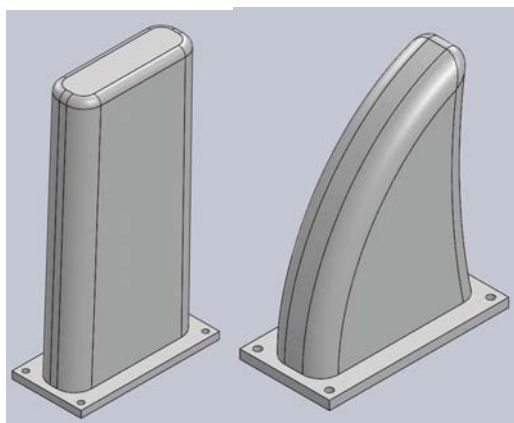


FIGURA 4.22: Barbatana Dorsal V1 (Esquerda) e V2 (Direita)  
Fonte: Imagem retirada do desenho da peça em *SolidWorks*

Para criar esta barbatana dorsal será utilizada borracha eco-flex, e proceder-se-á de forma análoga ao fabrico da cobertura traseira. Para tal, é necessário fabricar moldes externo (imagem à esquerda da figura 4.23) e interno (imagem à direita da figura 4.23) da mesma, impressos em PLA à semelhança da cobertura traseira.

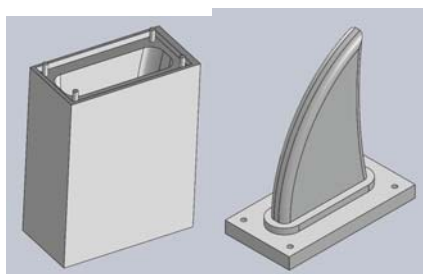


FIGURA 4.23: Molde Externo (Esquerda) e Interno (Direita) da Barbatana Dorsal

Fonte: Imagem retirada do desenho da peça em *SolidWorks*

Esta barbatana assenta na pega da cobertura central, e a zona de contacto destas partes torna-se um ponto crítico relativamente à estanquidade da plataforma.

Tendo em vista a preservação da mesma, imprimiu-se em PLA uma peça dedicada ao aperto da barbatana dorsal contra a pega da cobertura central através de 4 furações ISO M4 (Figura 4.24). O aperto dos parafusos empurra a peça de acoplamento contra a barbatana dorsal, que é esmagada entre esta e a pega da cobertura central, impedindo a infiltração de água.

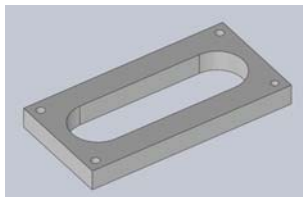


FIGURA 4.24: Acoplamento Barbatana Dorsal/Pega Cobertura Central

Fonte: Imagem retirada do desenho da peça em *SolidWorks*

### 4.2.6 Tanque de Flutuabilidade

O tanque de flutuabilidade é um mecanismo que admite ou expelle água para o interior do veículo, alterando ativamente a reserva de flutuabilidade do mesmo. O objetivo deste sistema é possibilitar a alteração da profundidade de operação da plataforma, independentemente do seu seguimento, aumentando a manobrabilidade deste através da incorporação de um sistema simples constituído por duas seringas de 100ml (que servem como tanques de lastro), cujos batentes são impulsionados por motores passo-a-passo. Dado que os motores passo-a-passo não possuem encoders, não é possível saber qual a posição em que se encontram os batentes. Daí a necessidade de incorporar fins-de-curso, que permitem fazer a calibração inicial do sistema (cada vez que o sistema é ligado, os motores movem os batentes até os fins-de-curso serem ativados, estabelecendo a posição inicial do sistema, e a partir daí determinam a posição dos batentes através da contagem dos passos que o motor realiza) e garantem que o motor não atua os batentes para além dos valores máximos e mínimos pretendidos (valor máximo é dado quando os batentes acionam os fins-de-curso e o mínimo pode ser limitado através da contagem de um determinado número de passos a partir do valor máximo).

Este sistema é constituído por duas estruturas de suporte impressas em PLA, uma AV (imagem em cima, à esquerda na figura 4.25) e outra AR (imagem em cima, à direita na figura 4.25), dois motores passo-a-passo NANOTEC LA421L13-A-TJCA (Figura 4.4), dois fins-de-curso<sup>13</sup> (imagem em baixo, à esquerda na figura 4.25) e duas seringas (Figura 4.2).

As estruturas de suporte são a fundação deste sistema, e é através delas que o mesmo fica fixo nos varões estruturais, na posição desejada. Na estrutura de suporte AV, os motores passo-a-passo são aparafusados na face anterior da mesma através de quatro parafusos ISO M3, e as seringas são mantidas em posição através

---

<sup>13</sup>Os fins-de-curso utilizados podem ser consultados no site <https://www.ptrobotics.com/microswitch/6151-microswitch-small-normal-lever-125v-1a.html>

de uma peça de acoplamento impressa em PLA (imagem em baixo, à esquerda na figura 4.25) e quatro parafusos ISO M4. Na face posterior da estrutura de suporte AV é possível observar duas saliências destinadas à fixação dos fins-de-curso através de duas furações ISO M2, e dois sulcos que se juntam no centro da peça, destinados a passagem de cablagem dos mesmos. Os rasgos inferiores que se podem observar na imagem de cima, à esquerda na figura 4.25 destinam-se à integração das mesmas com as estruturas que suportam as baterias, as duas furações de 8mm é por onde passam os varões estruturais, sendo que os restantes rasgos existentes nas peças se destinam à passagem de cablagem e redução do peso das mesmas.

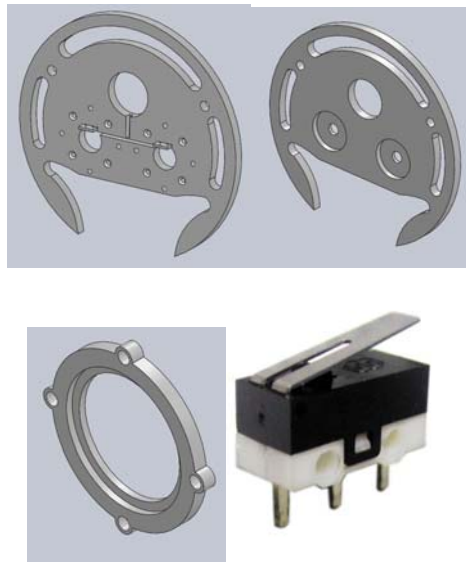


FIGURA 4.25: Estruturas de Suporte dos Tanques de Flutuabilidade AV (em cima, à esquerda), AR (em cima, à direita), Peça de Acoplamento Seringa/Estrutura (em baixo, à esquerda) e Fim-de-curso (em baixo, à direita)

Fonte: Imagens retiradas do desenho da peça em *SolidWorks* e do site do fornecedor PTRobotics, respetivamente

Da montagem de todos estes componentes resulta o sistema dos tanques de flutuabilidade (Figura 4.26).

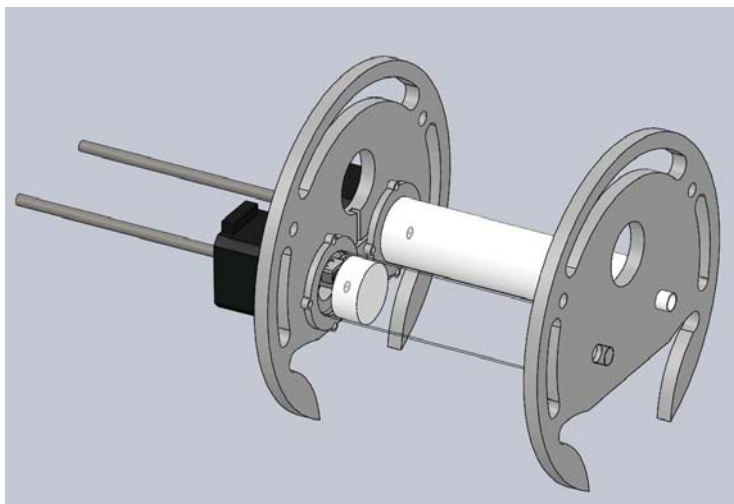


FIGURA 4.26: Tanques de Flutuabilidade  
Fonte: Imagem retirada do desenho da peça em *SolidWorks*

#### 4.2.7 Instalação Propulsora

A instalação propulsora foi desenhada tendo por base o veículo desenvolvido em Sander van den Berg (2019). À sua semelhança, apresenta uma «espinha» e um servo ligado a uma «costela» através de cabos de aço. A «espinha» neste projeto será simulada através de duas placas de acrílico, anterior (imagem à esquerda da figura 4.27) e posterior (imagem à direita da figura 4.27), ligadas às bases de apoio anterior (imagem à esquerda da figura 4.28) e posterior (imagem à direita da figura 4.28) dos servos por dois varões e às «costelas» anterior (imagem à esquerda da figura 4.29) e posterior (imagem à direita da figura 4.29) impressas em PLA pelos conectores anterior (imagem à esquerda da figura 4.30) e posterior (imagem à direita da figura 4.30), também impressos em PLA.

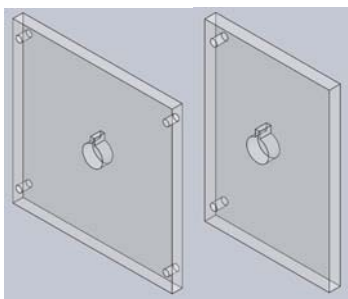


FIGURA 4.27: Placas em Acrílico Anterior (Esquerda) e Posterior (Direita)

Fonte: Imagem retirada do desenho da peça em *SolidWorks*

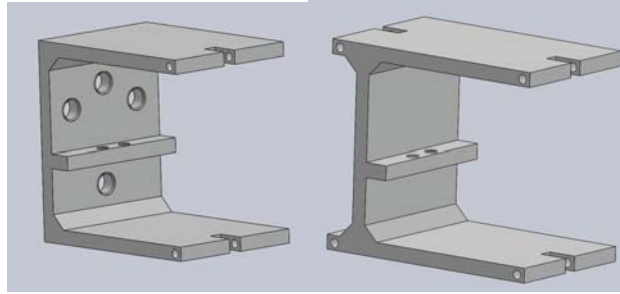


FIGURA 4.28: Bases de Apoio Anterior (Esquerda) e Posterior (Direita) dos Servos em PLA

Fonte: Imagem retirada do desenho da peça em *SolidWorks*

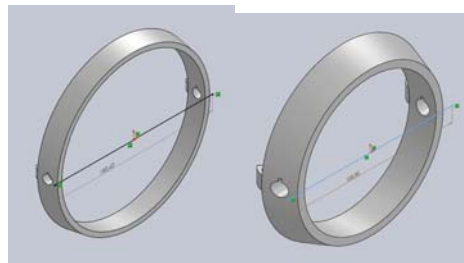


FIGURA 4.29: Costelas em PLA Anterior (Esquerda) e Posterior (Direita)

Fonte: Imagem retirada do desenho da peça em *SolidWorks*

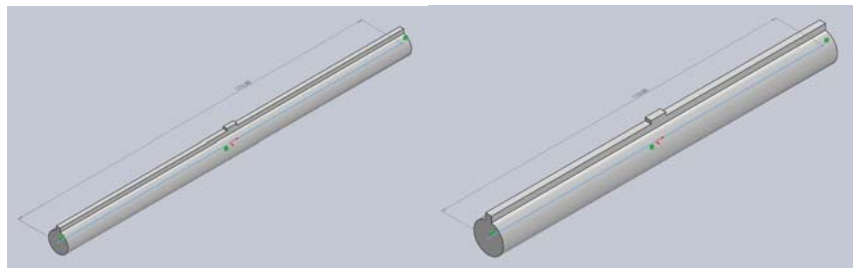


FIGURA 4.30: Conectores em PLA Anterior (Esquerda) e Posterior (Direita)

Fonte: Imagem retirada do desenho da peça em *SolidWorks*

Através da junção de todos estes componentes, obtém-se a instalação propulsora (Figura 4.31). A fixação da mesma ao disco estrutural AR será feita através das quatro furações de 8mm em cruz na face anterior da base de suporte de servo anterior.

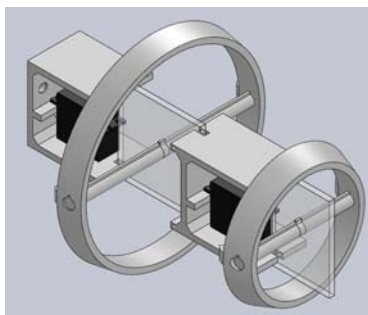


FIGURA 4.31: Instalação Propulsora  
Fonte: Imagem retirada do desenho da peça em *SolidWorks*

#### 4.2.8 Estruturas de Suporte em PLA

Para além do uso extensivo que já foi abordado do PLA e da tecnologia de impressão 3D neste projeto, as bases que suportam toda a eletrônica de potência e baterias também serão concebidas recorrendo a esta forma de manufatura. A base para a Jetson Nano e Arduino Mega encontra-se na imagem à esquerda da figura 4.32 e a base das baterias encontra-se na imagem à direita da mesma figura.

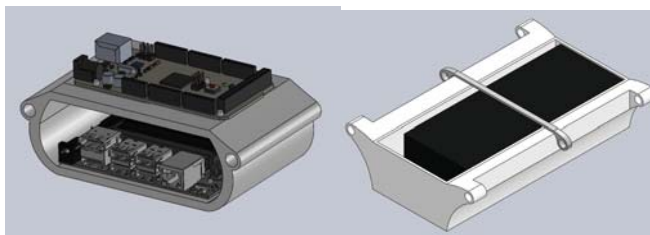


FIGURA 4.32: Estrutura de suporte da Jestson Nano e Arduino Mega (Esquerda) e das baterias (Direita)

Fonte: Imagem retirada do desenho da peça em *SolidWorks*

Estas estruturas passam pelos varões estruturais, e são fixas na posição desejada através de porcas e contraporcas.

### 4.3 Características do Protótipo

Neste sub-capítulo serão discutidas as características do protótipo, referenciando as dimensões projetadas, margem de fluutuabilidade do mesmo e cálculos da massa de lastro fixo necessária para evitar o caimento do veículo.

#### 4.3.1 Dimensões do Protótipo

Recorrendo ao *SolidWorks*, elaborou-se uma *assembly* de todos os sistemas criados, obtendo-se o protótipo da figura 4.33. As dimensões do mesmo estão explícitas na figura 4.34.



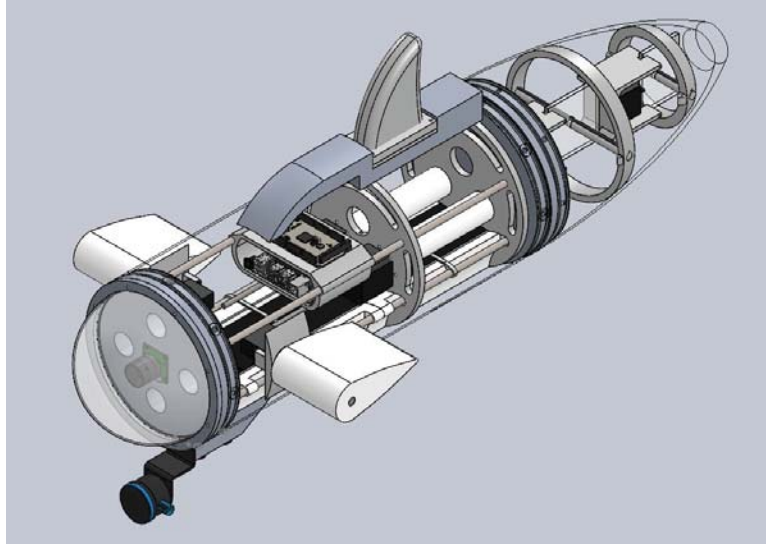


FIGURA 4.33: Protótipo V3

Fonte: Imagem retirada do desenho da peça em *SolidWorks*

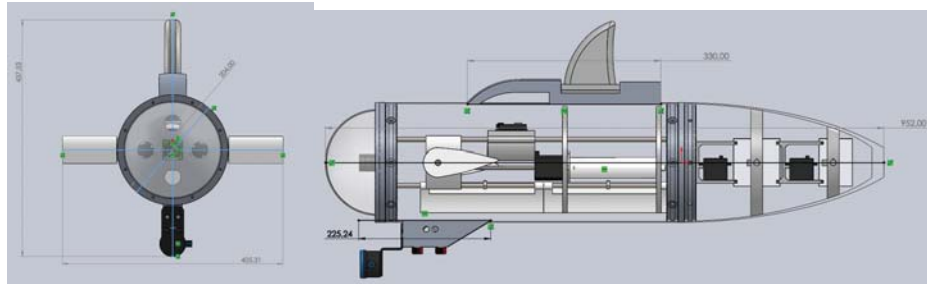


FIGURA 4.34: Dimensões do Protótipo V3 - Vista Frontal (Esquerda) e Lateral (Direita)

Fonte: Imagem retirada do desenho da peça em *SolidWorks*

### 4.3.2 Margem de Flutuabilidade do Protótipo

Para validar a aproximação inicial estimada na folha de cálculo Excel, utilizou-se a função *Evaluate Mass Properties* do *SolidWorks* para comparar a massa estimada do veículo (Anexo VII.1) com o volume deslocado pelo mesmo (Anexo VIII.1).

Dos anexos VII.1 e VIII.1, foi possível obter que a massa estimada para o protótipo, nesta fase, é  $M_{Prot} = 20.85kg$  e que o volume total deslocado pelo mesmo é de  $V_{Des} = 27.24dm^3$ .

É possível calcular a massa que o veículo pode ter através da fórmula:

$$M_{Poss} = \rho \times V_{Des} \quad (4.13)$$



Onde  $M_{Poss}$  é a massa possível para o protótipo,  $\rho$  é a densidade da água e  $V_{Des}$  é o volume total deslocado pelo protótipo.

Realizando os cálculos, verificamos que o protótipo pode ter uma massa de  $M_{Poss} = 1.025kg/dm^3 \times 27.24dm^3 \approx 27.92kg$ , de forma a garantir a condição de flutuabilidade neutra. É possível calcular a percentagem da margem de massa que ainda é possível introduzir no veículo sem comprometer essa condição através da fórmula:

$$M_{Marg} = \frac{M_{Poss} - M_{Prot}}{M_{Poss}} \times 100, \quad (4.14)$$

onde  $M_{Marg}$  é a margem de massa para o protótipo,  $M_{Poss}$  é a massa possível para o veículo e  $M_{Prot}$  é a massa do protótipo.

Realizando os cálculos, a margem de massa para o protótipo é de  $M_{Marg} = \frac{27.92-20.85}{27.92} \times 100 = \frac{7.07}{27.92} \times 100 \approx 25.3\%$ . Considerando que o modelo atual do protótipo não incorpora a massa de lastro fixo, parafusos, porcas e cablagem, assim como outros componentes imprevistos que possam vir a ser introduzidos, a margem de 7.07kg parece um valor adequado e seguro à continuação do projeto.

#### 4.3.3 Cálculo de Lastro Fixo

Dos anexos VII.1 e VIII.1, é possível verificar que a distância<sup>14</sup> entre o centro de massa (CM) e o centro de impulsão (CI) é de  $d_{CM-CI} = 33.74 \times 10^{-3}m$ . Este desfasamento gera um momento inclinante longitudinal (MIL), dado que o CM se encontra AV do CI, que faz o veículo mergulhar a proa e que pode ser determinado através da fórmula:

$$M_{Incl-Long} = \Delta \times d_{CM-CI}, \quad (4.15)$$

onde  $M_{Incl-Long}$  é o MIL,  $\Delta$  é o deslocamento e  $d_{CM-CI}$  é a distância entre o CM e o CI.

Dado que quando o veículo está submerso não existe área de flutuação, não existe contributo do segundo momento de área da mesma por forma a atenuar o MIL. Isto implica que, desde que o CM e o CI não se alterem, o veículo apresentará sempre um ângulo de caimento AV. Existem dois métodos de compensar o caimento e reduzir este ângulo:

O primeiro método consiste em variar ativamente o ângulo de ataque que as barbatanas peitorais fazem com o plano horizontal, em conjunto com o seguimento do navio, para gerar uma força de impulso ascendente nas barbatanas, semelhante ao que acontece nas asas de uma aeronave. Dado que o ponto onde é gerado o impulso se encontra AV do CI e a uma certa distância deste, origina um MIL contrário ao

---

<sup>14</sup>A distância do CM e do CI são medidas em relação à origem do referencial do protótipo em *SolidWorks* que se localiza no centro do disco estrutural AR. A distância longitudinal entre o CM e o CI pode ser obtida através da subtração dos valores das suas posições no eixo dos *zz*

que naturalmente ocorre no veículo, atenuando o seu efeito e reduzindo o ângulo de caimento apresentado. Este método de correção dinâmico do caimento exige uma análise detalhada e complexa das barbatanas peitorais, e o impacto que a forma das mesmas tem na geração do impulso hidrodinâmico ascendente. Dada a complexidade desta análise, o método em seguida explicado poderá ser mais exequível e adequado.

O segundo método consiste na introdução de lastro fixo AR do CI, numa posição tal que o binário endireitante causado por este mitigue o MIL natural do navio. Admitindo que a incorporação deste lastro não afeta a posição do CM<sup>15</sup>, podemos considerar o balanço de forças e momentos em torno do CI, de forma semelhante à análise de uma viga (Figura 4.35) para calcular a massa de lastro necessária ou a sua posição, fixando um desses valores.

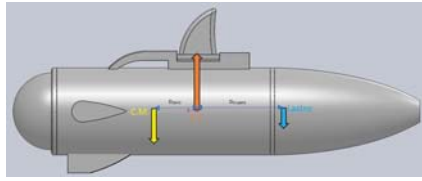


FIGURA 4.35: Análise de Forças e Momentos no Centro de Impulsão

Fonte: Imagem retirada do desenho da peça em *SolidWorks*

Para o veículo estar em equilíbrio, o somatório das forças e momentos em torno do CI tem que ser zero, do qual resulta:

$$\sum F_{CI} = 0 \iff C.I. - C.M. - Lastro = 0 \quad (4.16)$$

$$\sum M_{CI} = 0 \iff C.M. \times d_{CM-CI} - Lastro \times d_{CI-Lastro} = 0, \quad (4.17)$$

onde  $C.I.$  é a força de impulsão,  $C.M.$  é o peso do protótipo,  $Lastro$  é o peso do lastro fixo,  $d_{CM-CI}$  é a distância entre o CM e o CI, e  $d_{CI-Lastro}$  é a distância entre o CI e o lastro fixo.

Resolvendo a equação (15) em ordem a  $C.M.$  obtém-se:

$$C.M. = C.I. - Lastro, \quad (4.18)$$

substituindo este resultado na equação (16) e resolvendo em ordem a  $Lastro$ , vem que:

<sup>15</sup>A consideração que a posição do CM não será afetada pela introdução de uma massa de lastro fixo é claramente virtual. O objetivo de introduzir essa massa é de deslocar o CM de forma a que este coincida no plano longitudinal com o CI, logo não é absolutamente correto dizer que a introdução de dita massa não afeta a posição do CM. Contudo, só é possível estimar a massa que é necessária introduzir e onde a mesma deve ser inserida através desta aproximação.

$$Lastro = \frac{C.I. \times d_{CM-CI}}{d_{CM-CI} + d_{CI-Lastro}} \quad (4.19)$$

Assumindo que o lastro fixo é colocado na face posterior do disco estrutural AR, pode-se calcular a distância do CI ao lastro fixo através da fórmula:

$$d_{CI-Lastro} = d_{CI-O} + d_{O-Lastro}, \quad (4.20)$$

onde  $d_{CI-O}$  é a distância entre o CI e a origem do referencial, e  $d_{O-Lastro}$  é a distância entre a origem do referencial e o lastro fixo. O valor de  $d_{CI-O}$  pode ser retirado do modelo 3D do veículo (Anexo VIII.1), assim como o valor de  $d_{O-Lastro}$  (Figura 4.36), do qual resulta  $d_{CI-Lastro} = (182.4 + 25) \times 10^{-3}m = 207.4 \times 10^{-3}m$ .

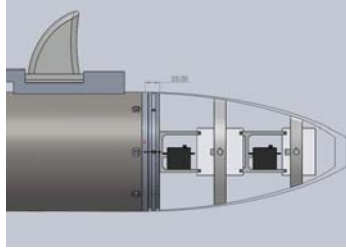


FIGURA 4.36: Distância entre a Origem do Referencial e o Lastro Fixo

Fonte: Imagem retirada do desenho da peça em *SolidWorks*

Dado que a força de impulsão a que o veículo está sujeito é igual ao peso da massa de volume deslocado pelo mesmo quando o veículo está completamente submerso, substituindo na equação (18) vem que  $Lastro = \frac{27.92 \times 9.8 \times 33.74 \times 10^{-3}}{(33.74 + 207.4) \times 10^{-3}} \iff Lastro \approx 38.3N$ .

A massa de lastro fixo  $m_{Lastro}$  necessária é igual a  $m_{Lastro} = \frac{Lastro}{g} \approx 3.91kg$ , se esta for colocada na face posterior do disco estrutural AR.

Dado que  $M_{Prot} + m_{Lastro} = 20.85 + 3.91 = 24.76kg$ , tem-se uma margem de  $M_{Poss} - M_{Prot} - m_{Lastro} = 27.92 - 24.76 = 3.16kg$  para porcas, parafusos, cablagem e outros componentes imprevistos. Mesmo considerando a massa necessária para o lastro do veículo, esta margem é adequada e segura para a continuação do projeto.

Numa iteração seguinte deste projeto pode-se considerar um sistema de lastro capaz de compensar mudanças de *payload*, por exemplo utilizando massas deslizantes que podem ser adicionadas ou retiradas do veículo, à semelhança do BUV3 (Figura 4.37).



FIGURA 4.37: Sistema Lastro Fixo BUV3

Fonte: Imagem retirada de «Technical Report on Milestone No. 7 in Project SABUVIS»

# Capítulo 5

## Testes

### 5.1 Preâmbulo

Dado o prazo de entrega da dissertação e o estado de desenvolvimento do protótipo do veículo aquando dos mesmos, não foi possível proceder à experimentação e aquisição de dados deste. Contudo, neste capítulo procede-se à descrição dos testes que se têm em vista executar, se o desenvolvimento do projeto assim o permitir antes da data da defesa da presente dissertação.

Faremos uma breve descrição de testes simples que se pretendem executar, e a finalidade dos mesmos ao longo deste capítulo. Dado que nenhuma bancada de testes foi especificamente desenvolvida para o veículo, os testes serão realizados duma forma simplificada face aquilo que era esperado ser feito no início deste projeto.

### 5.2 Testes

Neste sub-capítulo procede-se à descrição dos cinco testes que se previam realizar caso o desenvolvimento do protótipo e os constrangimentos temporais assim o permitissem. Procederemos à descrição cronológica destes testes, pois a realização dos mesmos está dependente da obtenção de resultados satisfatórios nos testes realizados previamente. Pretendia-se, sempre que possível, proceder à aquisição de imagens de todos os testes, fazendo uso de uma câmara GoPro ou semelhante.

#### 5.2.1 Teste de Estanquidade do Veículo

Este será o teste mais simples a ser realizado, que consiste na montagem da estrutura sem nenhum componente que possa ser danificado com a entrada de água no seu interior. Será colocado desperdício de jornal no seu interior para detetar entrada de água e lastro fixo por forma a simular baterias, eletrónica e restante equipamento. Posteriormente, a estrutura será colocada numa piscina (piscina exterior da Escola Naval, com uma profundidade de cerca de 3m) durante um período de tempo entre três e quatro horas. Em seguida, retira-se a estrutura da piscina, seca-se a mesma e procede-se à sua abertura. Caso exista alteração do grau de humidade do desperdício, podemos concluir que a estrutura não é estanque.

Como é explícito no título do teste, a sua finalidade é verificar se a estrutura é totalmente estanque ou não. Em caso negativo, será necessário analisar cuidadosamente que parte da estrutura compromete a condição de estanquidade e procurar formas de mitigar o problema. Se for verificado que a plataforma do veículo é estanque, uma futura iteração deste teste passa por realizar o mesmo à profundidade de projeto de 10m (ou no tanque existente no destacamento de mergulhadores).

### 5.2.2 Teste dos Tanques de Flutuabilidade

Este teste será realizado para verificar o funcionamento dos tanques de flutuabilidade em bancada, antes de colocar o sistema no veículo, e será realizado isoladamente de todos os outros sistemas. Para tal, basta proceder à montagem dos motores passo-a-passo e das seringas nas estruturas de suporte, colocar os fins-de-curso na posição projetada, ligar os tubos de passagem de fluído às seringas e passar os varões estruturais pelas estruturas de suporte, garantido a fixação da posição das mesmas através de porcas e contraporcas. Após se proceder à elaboração de um programa em Arduino para determinar a posição inicial do batente da seringa através dos fins-de-curso, procede-se com os testes do mesmo. Neste teste serão necessários uma bancada para suporte do sistema (duas calhas para suportar os varões estruturais serão suficientes) e um reservatório com água com capacidade para fornecer e receber água dos tanques (qualquer recipiente com uma capacidade de 300mL no qual se possam mergulhar os tubos dos tanques será aceitável).

O objetivo deste teste é validar o método de determinação de posicionamento inicial do batente da seringa através dos fins-de-curso, e verificar se o sistema consegue garantir uma condição de estanquidade e tempo de operacionalidade aceitáveis.

### 5.2.3 Teste de Flutuabilidade do Veículo

Este teste será uma iteração futura do teste anterior, em que se pretende proceder com a montagem integral do veículo e verificar a capacidade de variação de profundidade operacional do mesmo em ambiente controlado. Fazer-se-á uso de uma piscina, onde através da admissão e expulsão de água do veículo através do sistema dos tanques de flutuabilidade se pretende observar as variações da profundidade alcançada pelo veículo, sem que este apresente qualquer seguimento AV ou AR.

O objetivo deste teste é validar o mecanismo de alteração de imersão do veículo e determinar experimentalmente as velocidades de variação da mesma, consoante a quantidade de água presente nos tanques. Um dado experimental bastante relevante que se pretende extrair desta experimentação, é a quantidade de líquido necessária nos tanques para atingir o ponto de flutuabilidade neutra.

### 5.2.4 Teste de Mobilidade do Veículo

Este teste será realizado por forma a verificar a capacidade de movimentação do veículo em ambiente controlado. Recorrendo novamente à piscina, o veículo será

introduzido a uma profundidade de 1m e irá percorrer dois percursos, um em linha reta e um em «S», recorrendo à movimentação da cauda e barbatanas peitorais.

O objetivo deste teste é verificar a velocidade máxima do veículo (através do percurso em linha reta), assim como o seu grau de mobilidade (percurso em «S») e capacidade de controlo ou suavização de balanço e cabeceio, recorrendo à movimentação ativa das suas barbatanas peitorais.

### 5.2.5 Teste Misto

Este será o teste final que se pretende realizar com o protótipo, que passa por combinar todos os testes anteriores numa única experimentação. Fazendo uso de uma piscina, o veículo começará o teste à tona de água, procederá com uma submersão controlada sem seguimento, seguida de uma movimentação por um percurso previamente definido e terminará com a emersão sem seguimento no ponto final do percurso.

O objetivo deste teste é validar a capacidade operacional do protótipo num percurso simples, fazendo uso de todas as capacidades do mesmo para imersão, emersão e mobilização. Um veículo com esta capacidade de mobilidade é um ponto de começo para a otimização e desenvolvimento de algo que pode ser aplicado na prática, num teatro de operações real.





# Capítulo 6

## Lições Aprendidas e Trabalho Futuro

### 6.1 Lições Aprendidas

Neste tipo de dissertações, os erros cometidos, a sua razão de ser e como evitá-los no futuro é o maior contributo a retirar das mesmas. Assim sendo, discutir-se-ão os problemas que foram surgindo de forma cronológica, como melhor diagnosticar esses erros de forma a identificá-los atempadamente e meditar um pouco sobre o que pode ser feito por forma a mitigar os mesmos no futuro.

O maior contratempo deste projeto, e o primeiro a ser identificado, foram as pequenas incoerências e incompatibilidades que iam surgindo à medida que se iam desenvolvendo os diversos sistemas do veículo, o que implicava um investimento significativo de tempo a desenhar e redesenhar os mesmos. De forma isolada, os sub-sistemas não demonstravam nenhum problema, mas assim que se procedia à integração de um novo sub-sistema na *assembly* em SolidWorks desenvolvida até então, surgiam incompatibilidades incapazes de serem percecionadas anteriormente, que tornavam o sistema como um todo inviável. Este problema está subjacente a todos os projetos de desenvolvimento de veículos (e não só), e em conjunto com a busca de otimização, está na génese daquilo que é designado por «espiral de projeto» (Pawling, Percival & Andrews, 2017). Este modelo, amplamente utilizado na arquitetura naval, prevê uma série de iterações no desenvolvimento de um projeto e, até à data, não existe um algoritmo mais eficiente que este. Assim sendo, não é possível encontrar uma solução imediata e definitiva para este problema, e a única forma de o mitigar futuramente é, na fase de planeamento de uma dissertação futura, alocar uma incerteza de tempo alargada para a fase de desenho do protótipo. Embora esta «solução» não tenha impacto na presente dissertação, é *insight* relevante para quem vier a desenvolver no futuro este tema, ou outro semelhante.

Outro entrave que surgiu, foi a dificuldade em arranjar peças ou material no mercado com as dimensões ou forma desejadas, ou serviços com capacidade de maquinar os mesmos. Na presente dissertação, esse contratempo surge da ausência de consulta constante do mercado sobre serviços e materiais disponíveis a par do desenvolvimento do projeto. Dada a complexidade de todos os sistemas a serem desenvolvidos em simultâneo, não é expectável que um indivíduo memorize cada pormenor de todos eles e esteja a par da existência ou não dos meios necessários ao seu desenvolvimento, sem recorrer a um auxiliar de memória. Daí que este entrave

possa facilmente ser removido através do recurso a um mapa de encargos ou diário de projeto, onde se mantenha um registo rigoroso das decisões tomadas, a razão que levou à tomada das mesmas, e, neste caso em concreto, se existem materiais ou serviços disponíveis ao desenvolvimento de uma peça ou sistema.

O último percalço encarado, aquando da entrega da presente dissertação, foram as dificuldades de montagem dos sub-sistemas que constituem o veículo, nomeadamente no acoplamento de peças impressas em PLA. A utilização inadequada de folgas e irregularidades de algumas peças, levou a que várias delas não se conseguissem acoplar sem primeiro recorrer a uma lixa, e, em alguns casos, foi mesmo necessário voltar a imprimir a mesma peça. Dado que a tecnologia de impressão 3D é relativamente recente, o tempo necessário à impressão duma peça é bastante extenso e o depósito de material apresenta algumas irregularidades pontuais imprevisíveis, logo, mesmo que se adapte a margem de folga das peças, devido às irregularidades pontuais, não se garante que o problema de acoplamento seja resolvido. Com isto em consideração, resta aguardar que o desenvolvimento na área da manufatura aditiva, nomeadamente impressão 3D, proporcione um sistema que imprima peças com maior rigor e eficiência. De notar que apesar dos contratempos na montagem destas peças, o baixo custo associado à produção e a possibilidade de criar uma peça com a forma e dimensões desejadas, aliado à facilidade de detalhar as mesmas recorrendo a uma lixa, tornam o uso deste material e tecnologia muito apelativos para projetos futuros semelhantes.

Em suma, todos os problemas descritos são inerentes ao modelo da «espiral de projeto», e a forma mais eficiente de suprir os mesmos é através do recurso ao *know-how* previamente adquirido. Contudo, esse conhecimento só pode ser adquirido através da prática e experimentação, o que implica a existência de algo que possa ser experimentado em primeiro lugar. Mas, dada a necessidade desse conhecimento para poder criar algo que possa ser experimentado em primeiro lugar, terminamos com um paradoxo interessante: «O conhecimento necessário ao desenvolvimento de um projeto só pode ser adquirido através do desenvolvimento de um projeto semelhante». Este paradoxo não é novidade na comunidade científica, tem sido debatido durante anos e o paradigma adotado na sua resolução passa por experimentar, e da falha da experimentação, perceber a origem dos erros e como os colmatar. Esta linha de pensamento dá ênfase à ideia apresentada no início deste capítulo, e realça que o valor do desenvolvimento de um projeto não se encontra somente nas expectativas alcançadas, mas também no conhecimento que se consegue extrair do trabalho realizado.

## 6.2 Trabalho Futuro

Visto que neste trabalho foi desenvolvido o primeiro protótipo daquilo que se espera ser uma unidade executante do projeto SABUVIS, existe muito espaço para melhorias. Embora o veículo possa não vir a cumprir com as expectativas iniciais e possa ficar aquém de certos requisitos operacionais (nomeadamente velocidade máxima, dado que o valor estipulado como requisito é bastante elevado), como foi

referenciado no sub-capítulo anterior, é na análise objetiva e crítica do trabalho desenvolvido e das suas falhas que se pode extrair o valor do mesmo.

Neste sub-capítulo abordar-se-ão os seguintes aspetos a otimizar:

- Forma e dimensões do veículo;
- Otimização dos tanques de flutuabilidade;
- Otimização das baterias ou desenvolvimento dum sistema de carregamento que garanta a extensão de autonomia operacional do veículo;
- Otimização da instalação propulsora;
- Otimização do desenho da barbatana caudal;
- Otimização das barbatanas dorsal e peitorais;
- Procurar aumentar a verossimilhança do veículo à sua contra-parte biológica.

Começando pelas dimensões e forma do próprio veículo, a otimização da distribuição espacial dos componentes internos e da hidrodinâmica da forma externa são temas futuros bastante interessantes, assim como o estudo da hipótese de uma cobertura central de perfil hiperbólico (em vez do perfil circular). No protótipo atual, existe bastante espaço que não é devidamente capitalizado, e será certamente possível reduzir este espaço. O uso de um perfil hiperbólico para o veículo prende-se com a atenuação do balanço e com o aumento do grau de parecença a um peixe real. Qualquer alteração na forma e dimensões do veículo terá um impacto significativo na hidrodinâmica do veículo, e deve ser elaborado um estudo detalhado da mesma, assim como a integração de novas características para reduzir o atrito do veículo e aumentar a eficiência do sistema e melhorar o seu desempenho operacional a nível de manobrabilidade, velocidade e autonomia.

O sub-sistema dos tanques de flutuabilidade também carece de trabalho, nomeadamente, deve-se efetuar uma análise detalhada da velocidade de imersão consoante a quantidade de fluido nos tanques, deve ser estudada a possibilidade de um aumento da dimensão dos tanques para garantir uma reserva de flutuabilidade maior e o sistema deve ser reposicionado de forma ao centro de massa do veículo estar o mais próximo possível do centro de impulsão.

O sistema de alimentação elétrico do veículo deve garantir uma autonomia operacional extensa, e é dos principais entraves à aplicação deste protótipo em cenários reais. Uma autonomia de algumas horas não é suficiente para aplicar estes veículos em teatro operacional, sendo que a substituição do sistema atual por um que colmate este problema é imperativo. Como foi referenciado no capítulo 2, a alternativa ao sistema atual passa pela integração de um sistema movido através de energias renováveis, sendo que outra opção passa pelo desenvolvimento de uma estação de carregamento autónoma para o sistema atual.

O desenho da instalação propulsora tendo em vista o biomimetismo do veículo culminou numa forma de propulsão alternativa, bastante recente e pouco

estudada. Analisar o impacto que a mudança de dimensões, variação dos graus de liberdade, ângulo de batimento da cauda e frequência do movimento da mesma têm na impulsão gerada, velocidade de ponta obtida e manobrabilidade do veículo é imperativo para a otimização deste sub-sistema.

A barbatana caudal, à semelhança dos hélices do navio, são uma parte fundamental na criação de impulso do veículo. Tal como os hélices são intensivamente estudados, trabalhados e melhorados, também a cauda deste tipo de veículos merece um estudo dedicado e minucioso. O impacto que a forma, material, flexibilidade e detalhes existentes na cauda (ex.: nervuras) têm na manobrabilidade e velocidade do veículo não pode ser ignorado, e padece da necessidade de um estudo detalhado.

As barbatanas dorsal e peitorais desenhadas neste trabalho tinham em vista a incorporação das antenas no seu interior e a geração de impulso transversal, respetivamente. À semelhança da barbatana caudal, a forma e material das mesmas tem impacto na capacidade de manobrabilidade e velocidade alcançadas pelo veículo. A criação de uma bancada de estudo hidrodinâmico análogo a um túnel de vento é uma possibilidade de trabalho futuro que facilitaria esta análise, e facultaria a obtenção de dados experimentais visuais que dariam uma melhor percepção do impacto que mudanças subtis podem provocar no desempenho do veículo. Outra hipótese a ser estudada é a possibilidade de Análise de Fluídos Computacional (Computational Fluid Dynamics CFD) através do Solid Works Flow Simulation, que permitia uma pré-análise da hidrodinâmica do veículo projetado antes de se passar à fase de construção. A união destas duas hipóteses permitiria a validação do software Flow Simulation, que futuramente, e após validação experimental, seria uma ferramenta imprescindível no desenho e projeto de BUV's.

Com o aumento da verossimilhança do veículo à sua contra-parte biológica pretende-se alcançar o objetivo inicial do projeto de desenhar um veículo biomimético. Esta sugestão de trabalho futuro, embora possa tornar o veículo mais furtivo, trata-se fundamentalmente de uma questão de estética do veículo. Um passo a tomar neste sentido é, por exemplo, a alteração do método de incorporação da eco-sonda no veículo de forma a parecer mais natural, ou, como já foi referido, a adoção de um perfil hiperbólico para o veículo.

# Conclusão

O objetivo deste trabalho foi desenvolver um protótipo para uma unidade executante do projeto SABUVIS. Dada a complexidade do projeto, a quantidade de trabalho necessária a realizar, bem como alguns constrangimentos que dificultaram o normal desenrolar de um projeto de investigação (ex.:pandemia COVID-19), à data de entrega da presente dissertação apenas foram elaborados o desenho de projeto da plataforma do veículo em *SolidWorks* e os cálculos de estabilidade inicial. Também se procedeu à aquisição de diverso material por forma a montar e testar os sub-sistemas que constituem o veículo numa fase seguinte do projeto (expectável proceder a estes testes antes da defesa da presente dissertação).

Embora as expectativas iniciais do projeto não tenham sido cumpridas, o trabalho até agora desenvolvido e o conhecimento extraído dos diversos erros cometidos são resultados aceitáveis, que impactarão projetos futuros e abrem portas a outros temas, que passam pela continuação do projeto em busca da otimização de todos os sistemas que o constituem, com o objetivo de tornar este protótipo numa alternativa viável em diversos teatros de operações e aplicações. A contemporaneidade da ideia de desenho de veículos biomiméticos, assim como a instalação propulsora responsável pela sua movimentação característica, é um mundo a fim de ser desenvolvido, no sentido de otimização de desempenho das mesmas.

Termina-se com a ideia de que, embora os resultados obtidos não demonstrem a extensão das capacidades destes sistemas, a genialidade de desenho por forma a alojar todos os componentes, a distribuição espacial destes de forma a que o CM e o CI estejam o mais próximos possíveis, a introdução de sistemas que permitam compensar desequilíbrios do veículo, a capacidade de variação hidrostática de imersão associado à elevada manobrabilidade e furtividade destes veículos, tornam o investimento de tempo no desenvolvimento dos mesmos muito apelativo. Dado que as suas contra-partes biológicas sofreram milhões de anos de evolução até demonstrarem as suas qualidades atuais, é expectável que o desenvolvimento desta tecnologia leve algumas dezenas de anos até produzir um veículo capaz de cumprir os requisitos operacionais estabelecidos.



# Bibliografia

- Allotta, B., Costanzi, R., Ridolfi, A., Colombo, C., Bellavia, F., Fanfani, M., Pazzaglia, F., Salvetti, O., Moroni, D., Pascali, M. A., Reggiannini, M., Krusmaa, M., Salumäe, T., Frost, G., Tsiogkas, N., Lane, D. M., Cocco, M., Gualdesi, L., Roig, D., ... Daviddi, W. (2015). The ARROWS project: adapting and developing robotics technologies for underwater archaeology. *IFAC-PapersOnLine*, 48(2), 194–199. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.06.032>
- Behbahani, S. B., Jianxun Wang & Xiaobo Tan. (2013). A dynamic model for robotic fish with flexible pectoral fins, Em *2013 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, IEEE. <https://doi.org/10.1109/AIM.2013.6584316>
- Cai, Y., Bi, S. & Zheng, L. (2010). Design and Experiments of a Robotic Fish Imitating Cow-Nosed Ray. *Journal of Bionic Engineering*, 7(2), 120–126. [https://doi.org/10.1016/S1672-6529\(09\)60204-3](https://doi.org/10.1016/S1672-6529(09)60204-3)
- Cen, L. & Erturk, A. (2013). Bio-inspired aquatic robotics by untethered piezohydroelastic actuation. *Bioinspiration & Biomimetics*, 8(1), 016006. <https://doi.org/10.1088/1748-3182/8/1/016006>
- Conry, M., Keefe, A., Ober, W., Rufo, M. & Shane, D. (2013). BIOSwimmer: Enabling technology for port security, Em *2013 IEEE International Conference on Technologies for Homeland Security, HST 2013*, IEEE. <https://doi.org/10.1109/THS.2013.6699031>
- Crespi, A. & Ijspeert, A. (2008). Online Optimization of Swimming and Crawling in an Amphibious Snake Robot. *IEEE Transactions on Robotics*, 24(1), 75–87. <https://doi.org/10.1109/TRO.2008.915426>
- Crespi, A., Karakasiliotis, K., Guignard, A. & Ijspeert, A. J. (2013). Salamandra Robotica II: An Amphibious Robot to Study Salamander-Like Swimming and Walking Gaits. *IEEE Transactions on Robotics*, 29(2), 308–320. <https://doi.org/10.1109/TRO.2012.2234311>
- Cruz, N. A. & Matos, A. C. (2008). The MARES AUV, a Modular Autonomous Robot for Environment Sampling, Em *OCEANS 2008*, IEEE. <https://doi.org/10.1109/OCEANS.2008.5152096>
- Cui, R., Li, Y. & Yan, W. (2016). Mutual Information-Based Multi-AUV Path Planning for Scalar Field Sampling Using Multidimensional RRT. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 46(7), 993–1004. <https://doi.org/10.1109/TSMC.2015.2500027>
- Curet, O. M., Patankar, N. A., Lauder, G. V. & MacIver, M. A. (2011). Mechanical properties of a bio-inspired robotic knife fish with an undulatory propulsor. *Bioinspiration & Biomimetics*, 6(2), 026004. <https://doi.org/10.1088/1748-3182/6/2/026004>

- Farideddin Masoomi, S., Gutschmidt, S., Chen, X. & Sellier, M. (2015). The Kinematics and Dynamics of Undulatory Motion of a Tuna-Mimetic Robot. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 12(7), 83. <https://doi.org/10.5772/60059>
- Gao, J., Bi, S., Li, J. & Liu, C. (2009). Design and experiments of robot fish propelled by pectoral fins, Em *2009 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*, IEEE. <https://doi.org/10.1109/ROBIO.2009.5420688>
- Hu, H. (2006). Biologically inspired design of autonomous robotic fish at Essex, Em *Proceedings of the IEEE SMC UK-RI Chapter Conference on Advances in Cybernetic Systems*. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.153.5046%7B%5C%7Drep=rep1%7B%5C%7Dtype=pdf>
- Hu, T., Shen, L., Lin, L. & Xu, H. (2009). Biological inspirations, kinematics modeling, mechanism design and experiments on an undulating robotic fin inspired by *Gymnarchus niloticus*. *Mechanism and Machine Theory*, 44(3), 633–645. <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2008.08.013>
- Jindong Liu, Dukes, I. & Huosheng Hu. (2005). Novel mechatronics design for a robotic fish, Em *2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, IEEE. <https://doi.org/10.1109/IROS.2005.1545283>
- Katzschmann, R. K., DelPreto, J., MacCurdy, R. & Rus, D. (2018). Exploration of underwater life with an acoustically controlled soft robotic fish. *Science Robotics*, 3(16), eaar3449. <https://doi.org/10.1126/scirobotics.aar3449>
- Kim, Y. K. (2008). *Shape Memory Alloys* (D. C. Lagoudas, Ed.; Vol. 1). Boston, MA, Springer US. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-47685-8>
- Kodati, P., Hinkle, J., Winn, A. & Deng, X. (2008). Microautonomous Robotic Octrachiiform (MARCO): Hydrodynamics, Design, and Fabrication. *IEEE Transactions on Robotics*, 24(1), 105–117. <https://doi.org/10.1109/TRO.2008.915446>
- Kopman, V. & Porfiri, M. (2013). Design, Modeling, and Characterization of a Miniature Robotic Fish for Research and Education in Biomimetics and Bioinspiration (J. P. Desai, G. Dudek, O. Khatib & V. Kumar, Eds.). *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 18(2), 471–483. <https://doi.org/10.1109/TMECH.2012.2222431>
- Krishnamurthy, P., Khorrami, F., de Leeuw, J., Porter, M. E., Livingston, K. & Long, J. H. (2010). An electric ray inspired Biomimetic Autonomous Underwater Vehicle, Em *Proceedings of the 2010 American Control Conference*, Marriott Waterfront, Baltimore, MD, USA, IEEE. <https://doi.org/10.1109/ACC.2010.5530456>
- Lachat, D., Crespi, A. & Auke Jan Ijspeert. (2006). BoxyBot: a swimming and crawling fish robot controlled by a central pattern generator, Em *The First IEEE/RAS-EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics, 2006. BioRob 2006*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/BIOROB.2006.1639162>
- Leonard, N. & Graver, J. (2001). Model-based feedback control of autonomous underwater gliders. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 26(4), 633–645. <https://doi.org/10.1109/48.972106>



- Liu, H., Zhong, K., Fu, Y., Xie, G. & Zhu, Q. (2014). Pattern Recognition for Robotic Fish Swimming Gaits Based on Artificial Lateral Line System and Subtractive. *Sensors & Transducers*, 182(11), 207–216. [http://www.sensorsportal.com/HTML/DIGEST/P%7B%5C\\_%7D2526.htm](http://www.sensorsportal.com/HTML/DIGEST/P%7B%5C_%7D2526.htm)
- Liu, J., Wu, Z. & Yu, J. (2016). Design and implementation of a robotic dolphin for water quality monitoring, Em *2016 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*, IEEE. <https://doi.org/10.1109/ROBIO.2016.7866427>
- Liu, W., Jia, X., Wang, F. & Jia, Z. (2010). An in-pipe wireless swimming micro-robot driven by giant magnetostrictive thin film. *Sensors and Actuators A: Physical*, 160(1-2), 101–108. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2010.04.014>
- Low, K. H. (2007). Parametric Study of Modular and Reconfigurable Robotic Fish with Oscillating Caudal Fin Mechanisms, Em *2007 International Conference on Mechatronics and Automation*, IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICMA.2007.4303527>
- Low, K. H. (2011). Current and future trends of biologically inspired underwater vehicles, Em *2011 Defense Science Research Conference and Expo (DSR)*, Singapore, IEEE. <https://doi.org/10.1109/DSR.2011.6026887>
- Low, K. H., Chong, C. W. & Chunlin Zhou. (2010). Performance study of a fish robot propelled by a flexible caudal fin, Em *2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, IEEE. <https://doi.org/10.1109/ROBOT.2010.5509848>
- Manfredi, L., Assaf, T., Mintchev, S., Marrazza, S., Capantini, L., Orofino, S., Ascari, L., Grillner, S., Wallén, P., Ekeberg, Ö., Stefanini, C. & Dario, P. (2013). A bioinspired autonomous swimming robot as a tool for studying goal-directed locomotion. *Biological Cybernetics*, 107(5), 513–527. <https://doi.org/10.1007/s00422-013-0566-2>
- Marchese, A. D., Onal, C. D. & Rus, D. (2014). Autonomous Soft Robotic Fish Capable of Escape Maneuvers Using Fluidic Elastomer Actuators. *Soft Robotics*, 1(1), 75–87. <https://doi.org/10.1089/soro.2013.0009>
- McGovern, S., Alici, G., Truong, V.-T. & Spinks, G. (2009). Finding NEMO (novel electromaterial muscle oscillator): a polypyrrole powered robotic fish with real-time wireless speed and directional control. *Smart Materials and Structures*, 18(9), 095009. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/18/9/095009>
- Morgansen, K. A., Triplett, B. I. & Klein, D. J. (2007). Geometric Methods for Modeling and Control of Free-Swimming Fin-Actuated Underwater Vehicles. *IEEE Transactions on Robotics*, 23(6), 1184–1199. <https://doi.org/10.1109/LED.2007.911625>
- Nakabo, Y., Mukai, T. & Asaka, K. (2007). *Electroactive Polymers for Robotic Applications* (K. J. Kim & S. Tadokoro, Eds.). London, Springer London. <https://doi.org/10.1007/978-1-84628-372-7>
- Pawling, R., Percival, V. & Andrews, D. (2017). A Study into the Validity of the Ship Design Spiral in Early Stage Ship Design. *Journal of Ship Production and Design*, 33(2), 81–100. <https://doi.org/10.5957/JSPD.33.2.160008>

- Phamduy, P., Cheong, J. & Porfiri, M. (2016). An Autonomous Charging System for a Robotic Fish. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 21(6), 2953–2963. <https://doi.org/10.1109/TMECH.2016.2582205>
- Phamduy, P., Legrand, R. & Porfiri, M. (2015). Robotic Fish: Design and characterization of an interactive iDevice-controlled robotic fish for informal science education. *IEEE Robotics and Automation Magazine*, 22(1), 86–96. <https://doi.org/10.1109/MRA.2014.2381367>
- Pieterkosky, S., Cavanaugh, C. & Thompson, L. (2017). FaaS - Fish as a service biomimetic fish drone for ocean monitoring. *OCEANS 2017 - Anchorage, 2017-Janua*, 1–4. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85048180809%7B%5C%7DpartnerID=40%7B%5C%7Ddmd5=35ba060fc39bdf22dc7159e1867eed>
- Raj, A. & Thakur, A. (2016). Fish-inspired robots: design, sensing, actuation, and autonomy - a review of research. *Bioinspiration & Biomimetics*, 11(3), 031001. <https://doi.org/10.1088/1748-3190/11/3/031001>
- Introdução aos peixes robóticos
- Sander van den Berg. (2019). *Design of a high speed soft robotic fish* (tese de doutoramento). Delft University of Technology. <http://repository.tudelft.nl/>
- Sfakiotakis, M., Lane, D. & Davies, J. (1999). Review of fish swimming modes for aquatic locomotion. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 24(2), 237–252. <https://doi.org/10.1109/48.757275>
- Shen, F., Wei, C., Cao, Z., Xu, D., Yu, J. & Zhou, C. (2011). Implementation of a multi-link robotic dolphin with two 3-DOF flippers. *Journal of Computational Information Systems*, 7(7), 2601–2607.
- Sitorus, P. E., Nazaruddin, Y. Y., Leksono, E. & Budiyono, A. (2009). Design and Implementation of Paired Pectoral Fins Locomotion of Labriform Fish Applied to a Fish Robot. *Journal of Bionic Engineering*, 6(1), 37–45. [https://doi.org/10.1016/S1672-6529\(08\)60100-6](https://doi.org/10.1016/S1672-6529(08)60100-6)
- Sousa, A., Madureira, L., Coelho, J., Pinto, J., Pereira, J., Borges Sousa, J. & Dias, P. (2012). LAUV: The Man-Portable Autonomous Underwater Vehicle. *IFAC Proceedings Volumes*, 45(5), 268–274. <https://doi.org/10.3182/20120410-3-PT-4028.00045>
- Triantafyllou, M. S. & Triantafyllou, G. S. (1995). An Efficient Swimming Machine. *Scientific American*, 272(3), 64–70. <https://doi.org/10.1038/scientificamerican0395-64>
- Wai Leung Chan, Taesam Kang, Young Jae Lee, Sang Kyung Sung & Kwang Joon Yoon. (2007). Swimming study on an ostraciiform fish robot, Em *2007 International Conference on Control, Automation and Systems*, IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICCAS.2007.4406989>
- Wang, X., Shang, J., Luo, Z., Tang, L., Zhang, X. & Li, J. (2012). Reviews of power systems and environmental energy conversion for unmanned underwater vehicles. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(4), 1958–1970. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.12.016>
- Wang, Z., Wang, Y., Li, J. & Hang, G. (2009). A micro biomimetic manta ray robot fish actuated by SMA, Em *2009 IEEE International Conference on Robotics*

- and Biomimetics (ROBIO)*, IEEE. <https://doi.org/10.1109/ROBIO.2009.5420423>
- Williams, R. B. & Inman, D. J. (2002). An Overview of Composite Actuators with Piezoelectric Fibers. *2002 IMAC-XX: Conference & Exposition on Structural Dynamics*, 421–427. <https://pdfs.semanticscholar.org/b583/37717332c56709cd9ea0545418f25c.pdf>
- Yang, X., Wu, Z. & Yu, J. (2016). Design and implementation of a robotic shark with a novel embedded vision system, Em *2016 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*, IEEE. <https://doi.org/10.1109/ROBIO.2016.7866428>
- Yu, S., Ma, S., Li, B. & Wang, Y. (2009). An amphibious snake-like robot: Design and motion experiments on ground and in water, Em *2009 International Conference on Information and Automation*, IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICINFA.2009.5204975>



## Apêndice A - Folha de Cálculo Excel - Estimativa Inicial

Grupo	Descrição
<b>Grupo 1</b>	<b>Estrutura</b>
11	<b>Estrutura do Casco</b>
	Cilindro
	2x Discos Estruturais
12	<b>Estrutura Externa</b>
	Cobertura Frontal
	Cobertura Traseira
13	<b>Estrutura Interna</b>
	3x Varões de Apoio Estrutural
	2x Apoios TQ's Lastro
14	<b>Pequeno Aprestamento Estrutural</b>
	Xx Estruturas de Suporte
15	<b>Superfícies de Controlo</b>
	2x Barbatanas Peitorais
	Barbatana Dorsal
	Barbatana Caudal
<b>Grupo 1</b>	<b>Totais</b>
<b>Grupo 2</b>	<b>Sistemas da Propulsão</b>
21	<b>Servo motores e Mecanismos</b>
	Servos Cauda
	Servos Barbatanas Peitorais
22	<b>Cadeia de Transmissão</b>
	Veios
	Vedantes
<b>Grupo 2</b>	<b>Totais</b>
<b>Grupo 3</b>	<b>Sistemas Elétricos</b>
31	<b>Baterias</b>
	Baterias principais
	Isolamento Térmico
32	<b>Distribuição elétrica</b>
	Cablagem
<b>Grupo 3</b>	<b>Totais</b>
<b>Grupo 4</b>	<b>Comando, Controlo &amp; Sensores</b>
41	<b>Sistemas</b>
	Sistema INS
	Sistema AHRS
	Sistema GSM

FIGURA A.1: Folha de Cálculo Excel - Estimativas Iniciais

## Apêndice B - Estrutura - Desenhos Técnicos

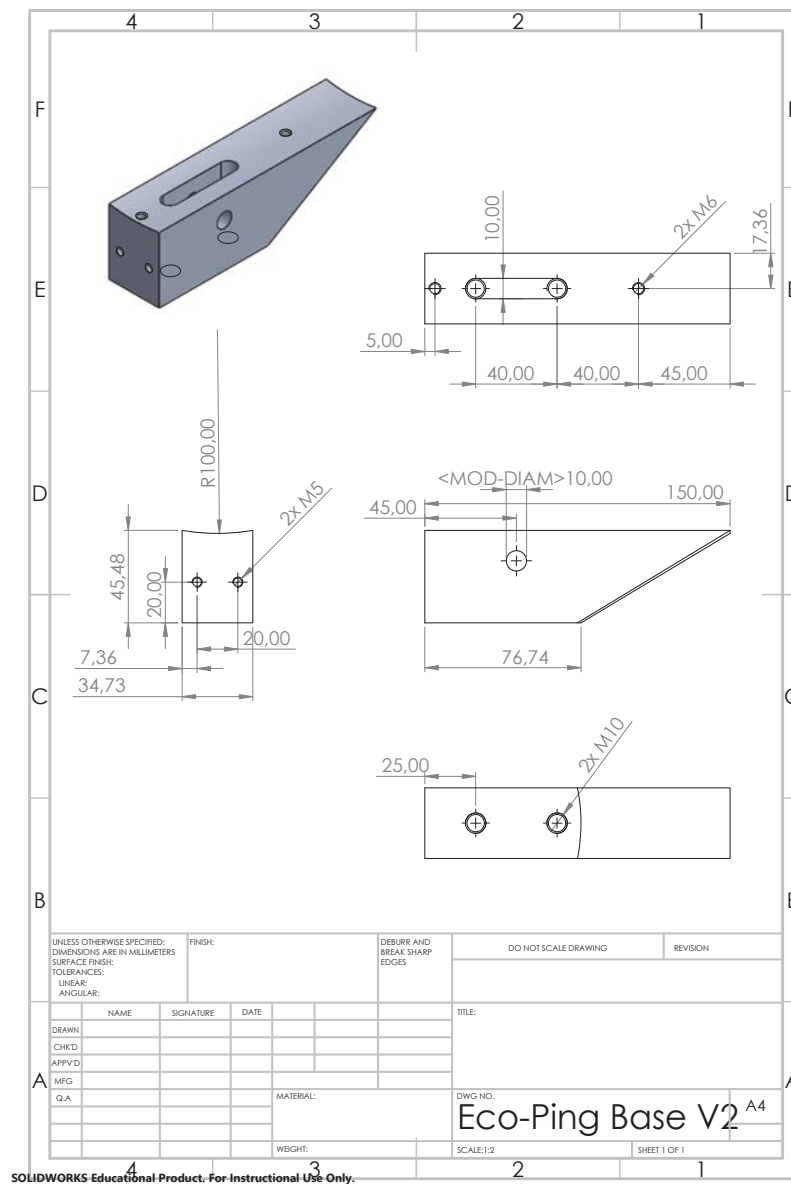


FIGURA B.1: Base dos Sensores do Cilindro Central





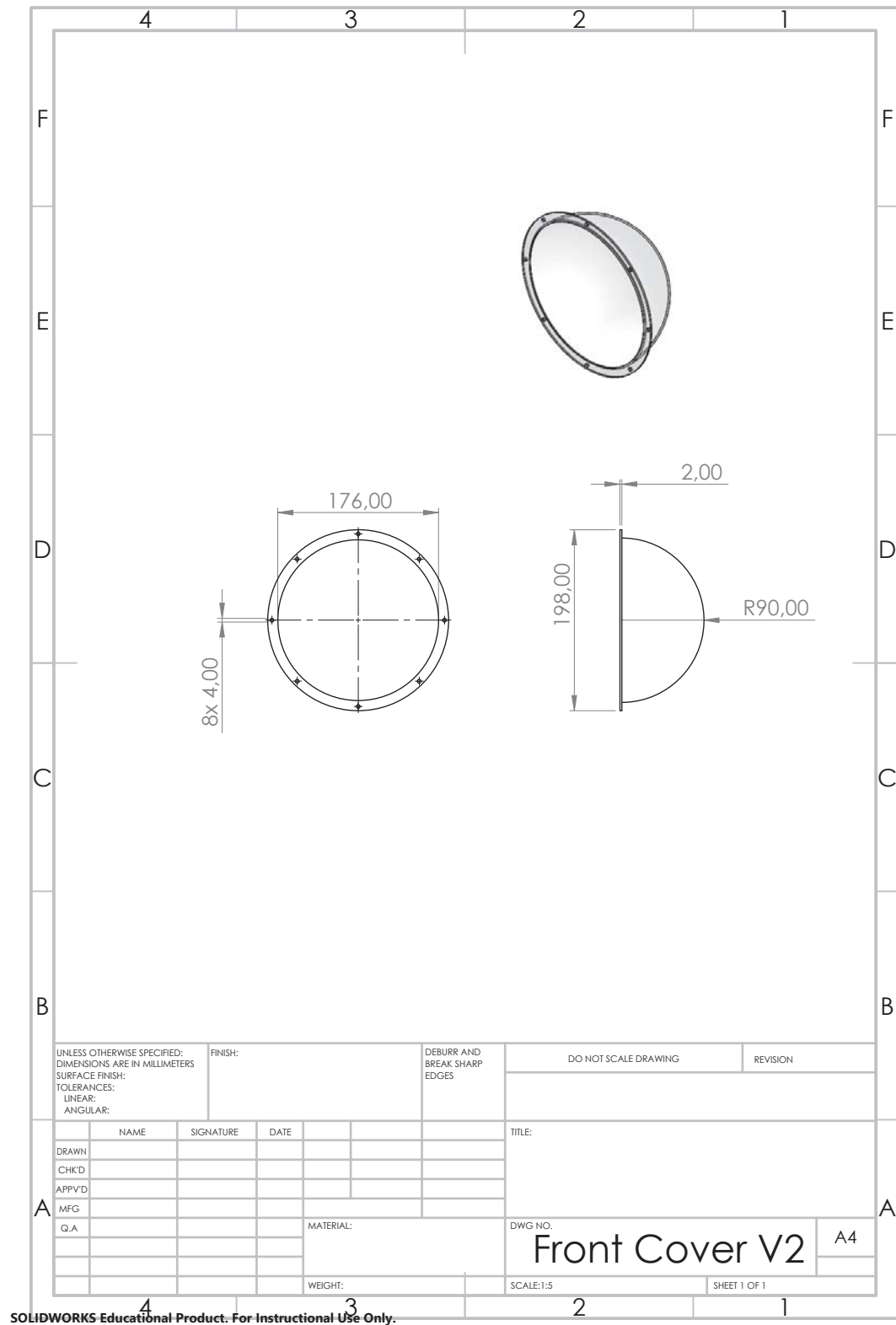


FIGURA B.3: Cobertura Frontal V3



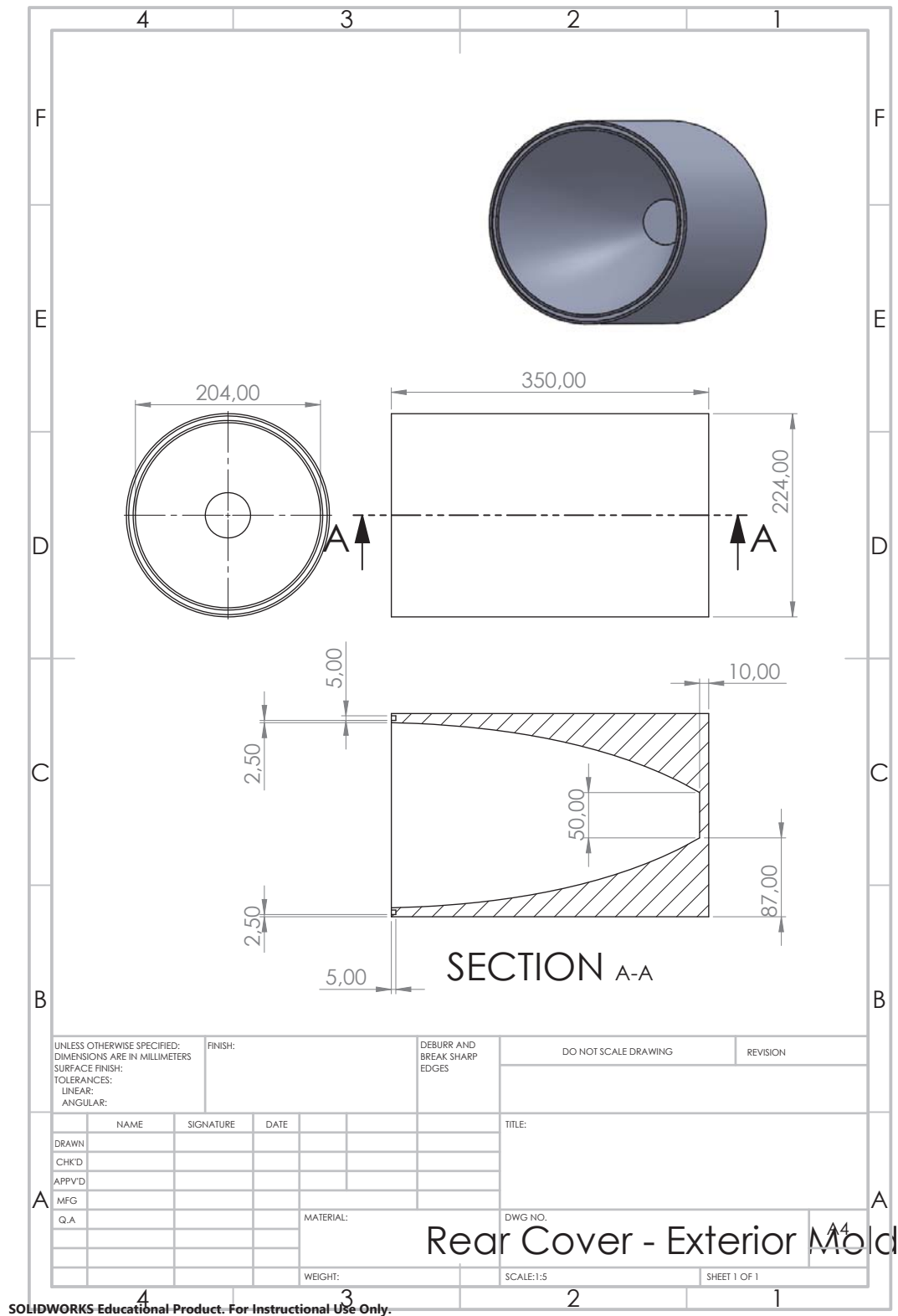


FIGURA B.5: Cobertura Traseira - Molde Exterior

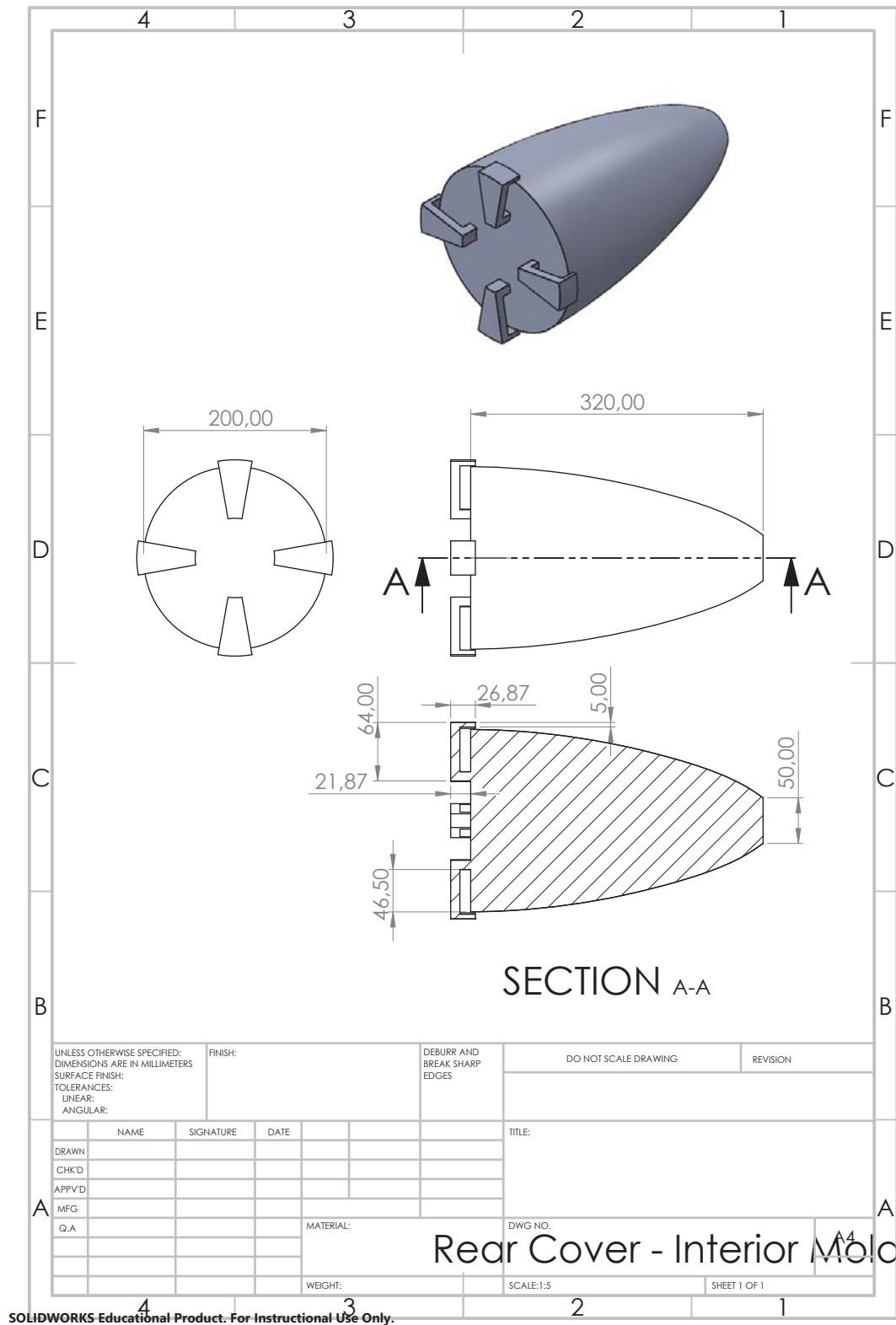


FIGURA B.6: Cobertura Traseira - Molde Interior



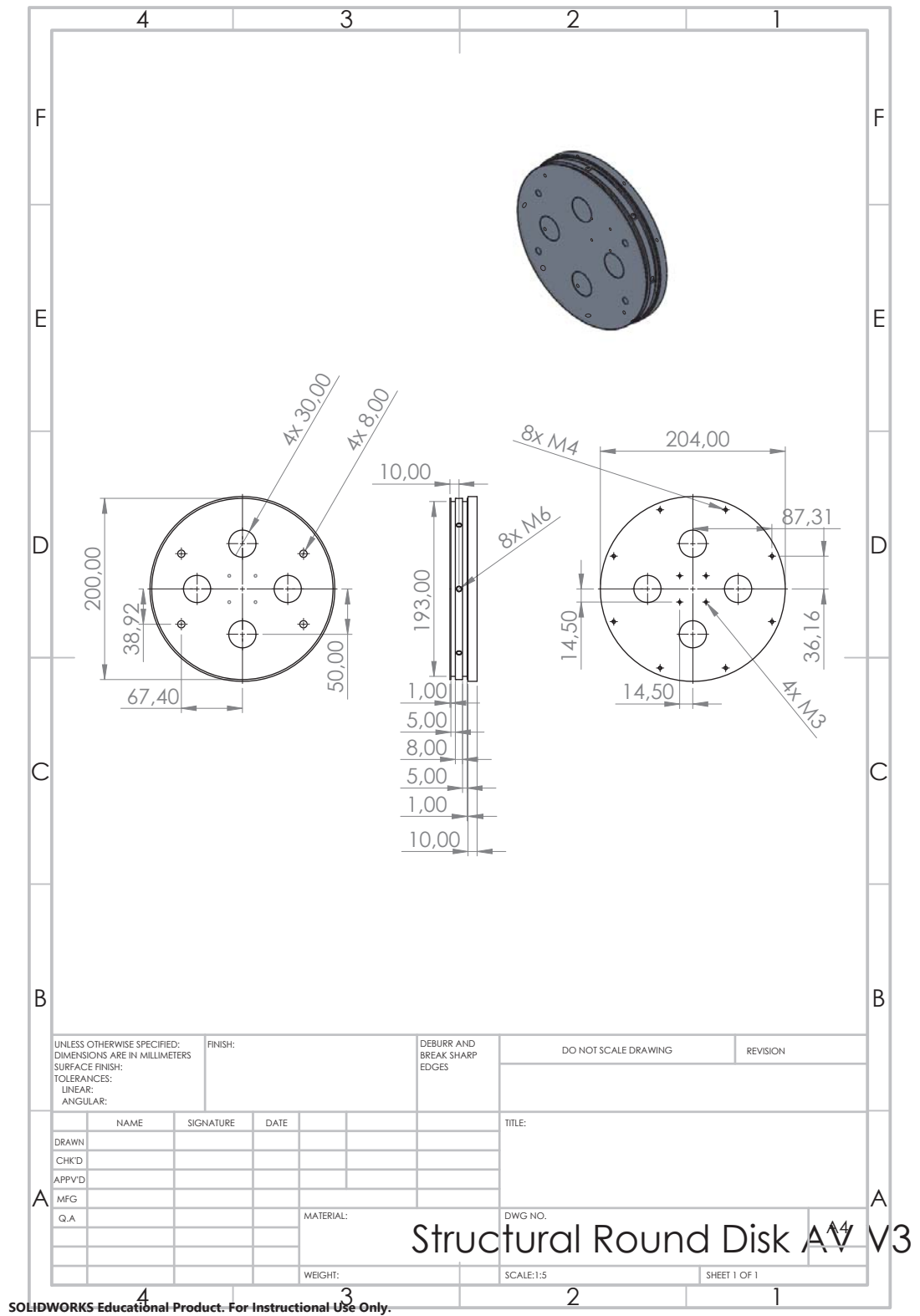


FIGURA B.8: Disco Estrutural AV V3

# Apêndice C - Instalação Propulsora - Desenhos Técnicos

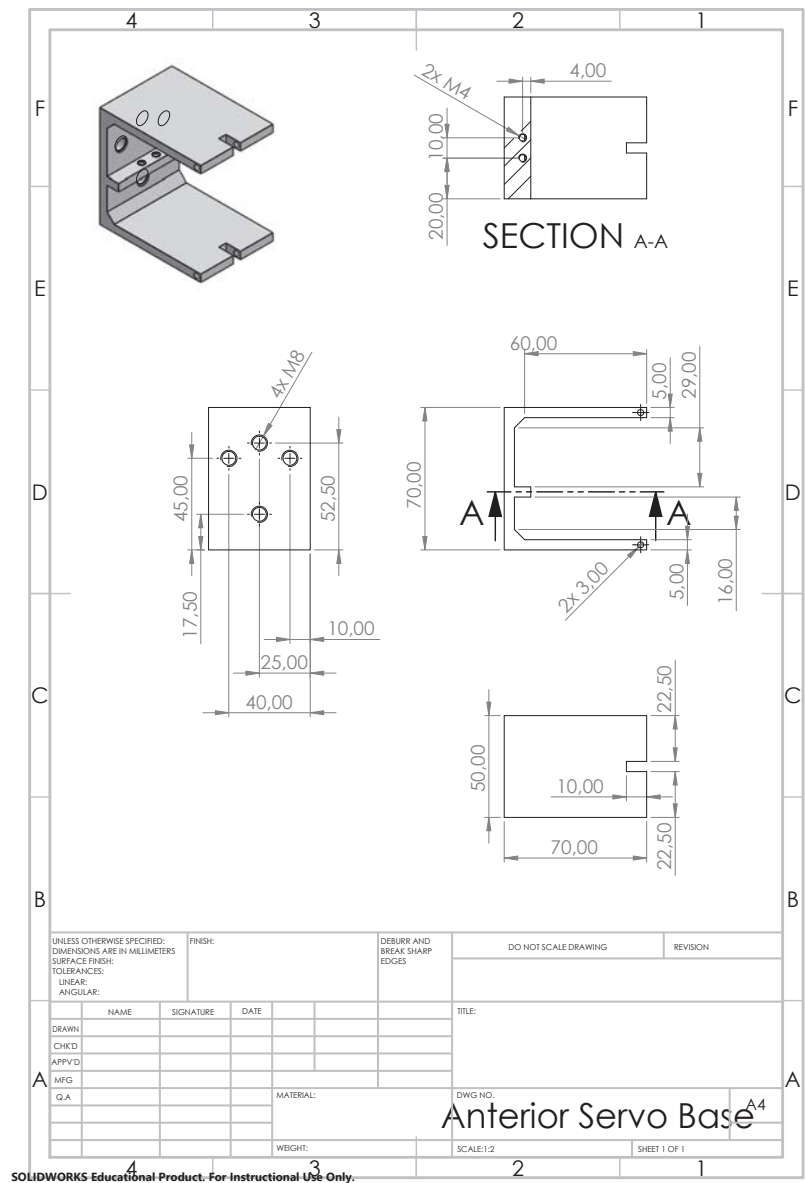


FIGURA C.1: Base do Servo Anterior

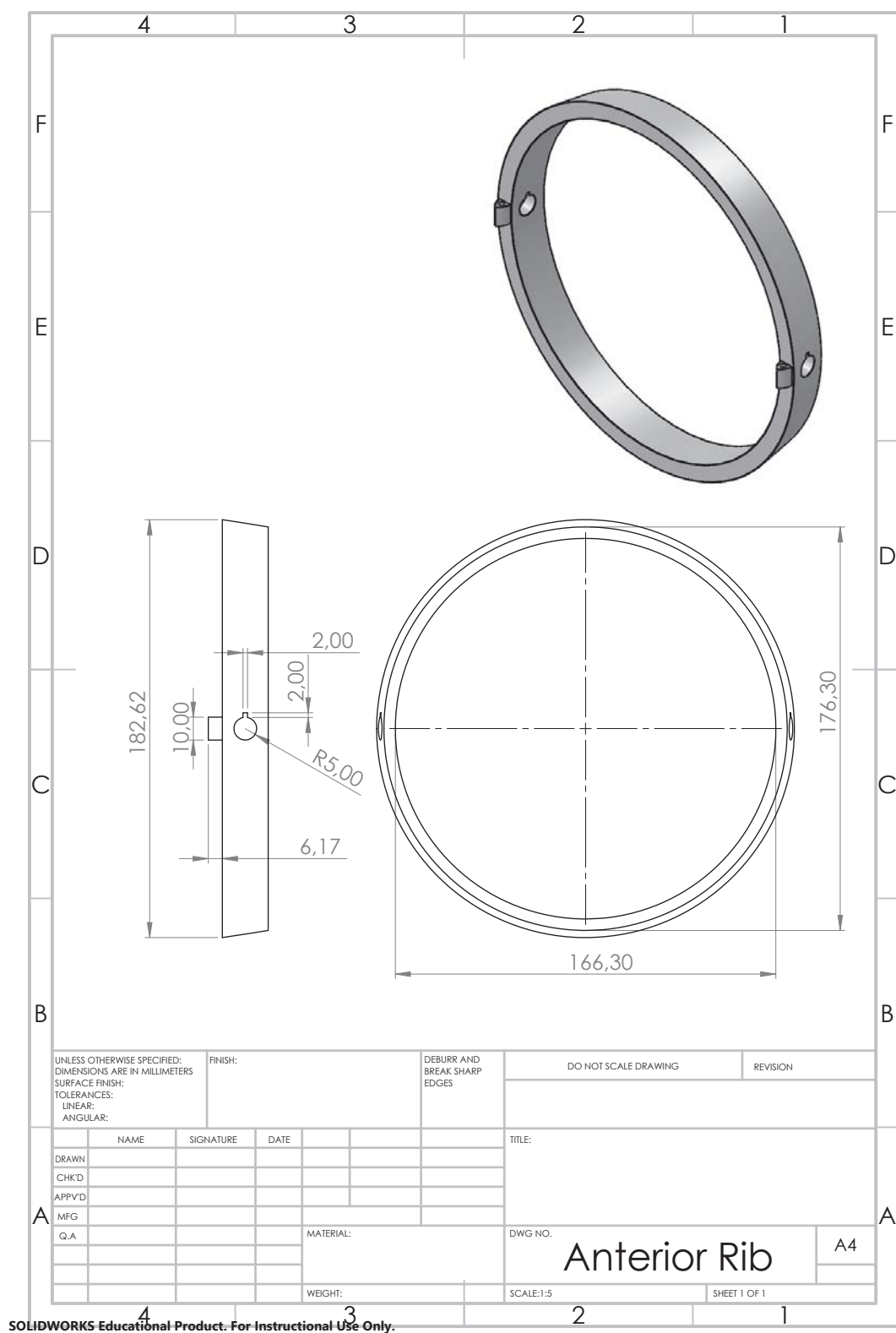


FIGURA C.2: Costela Anterior





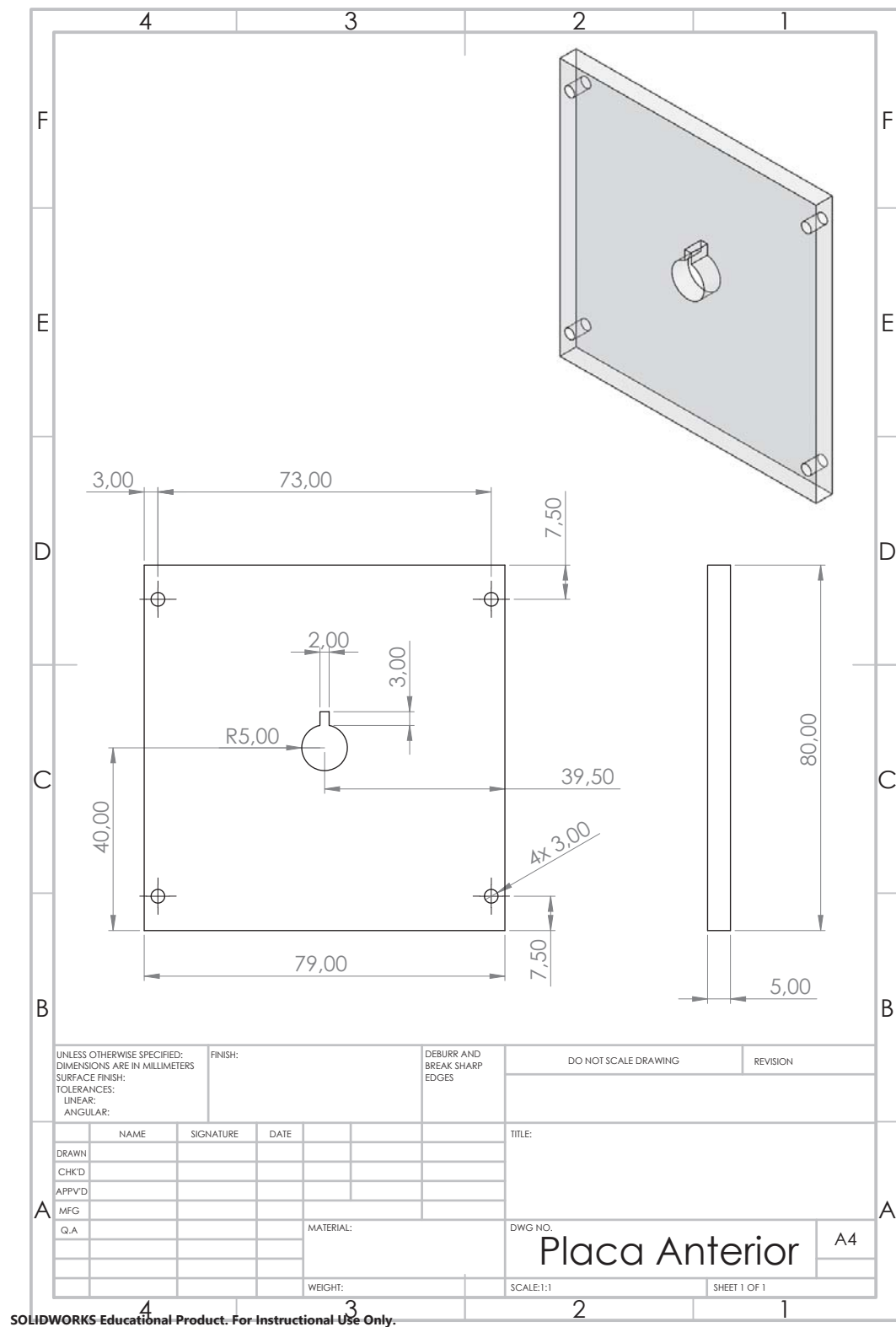


FIGURA C.4: Placa de Acrílico Anterior

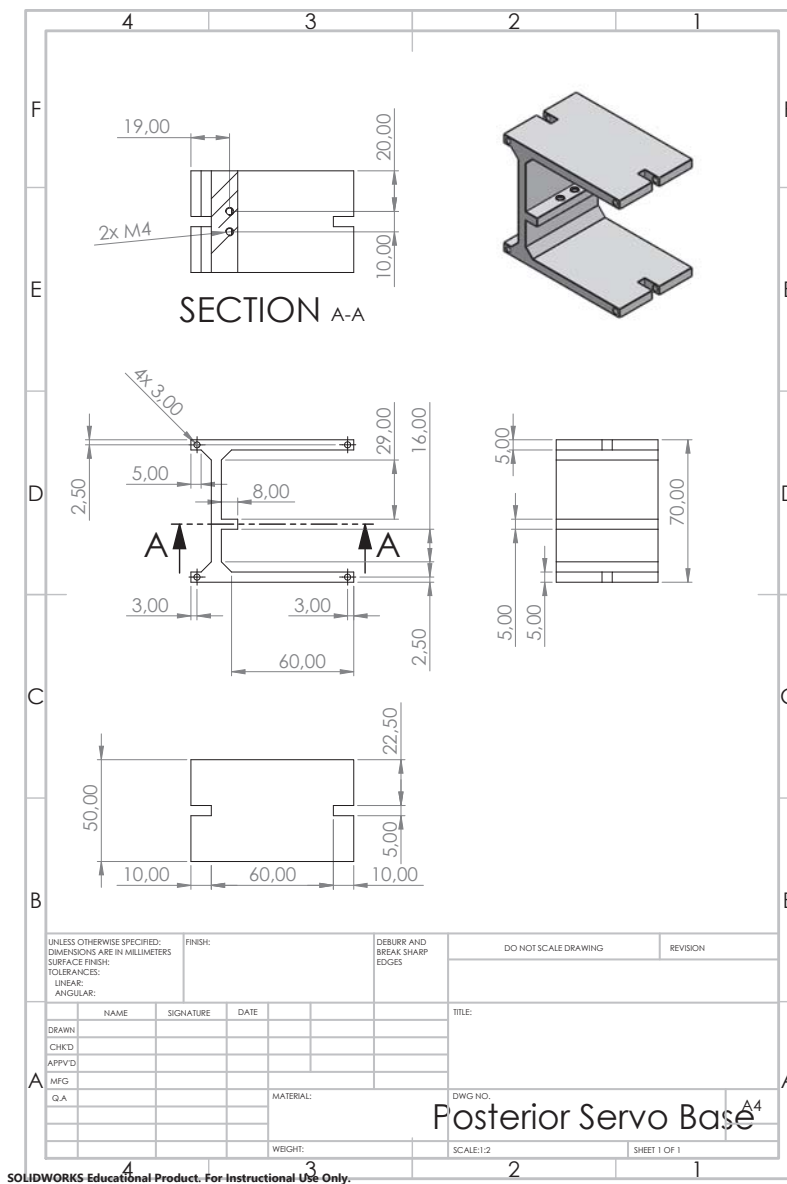


FIGURA C.5: Base do Servo Posterior

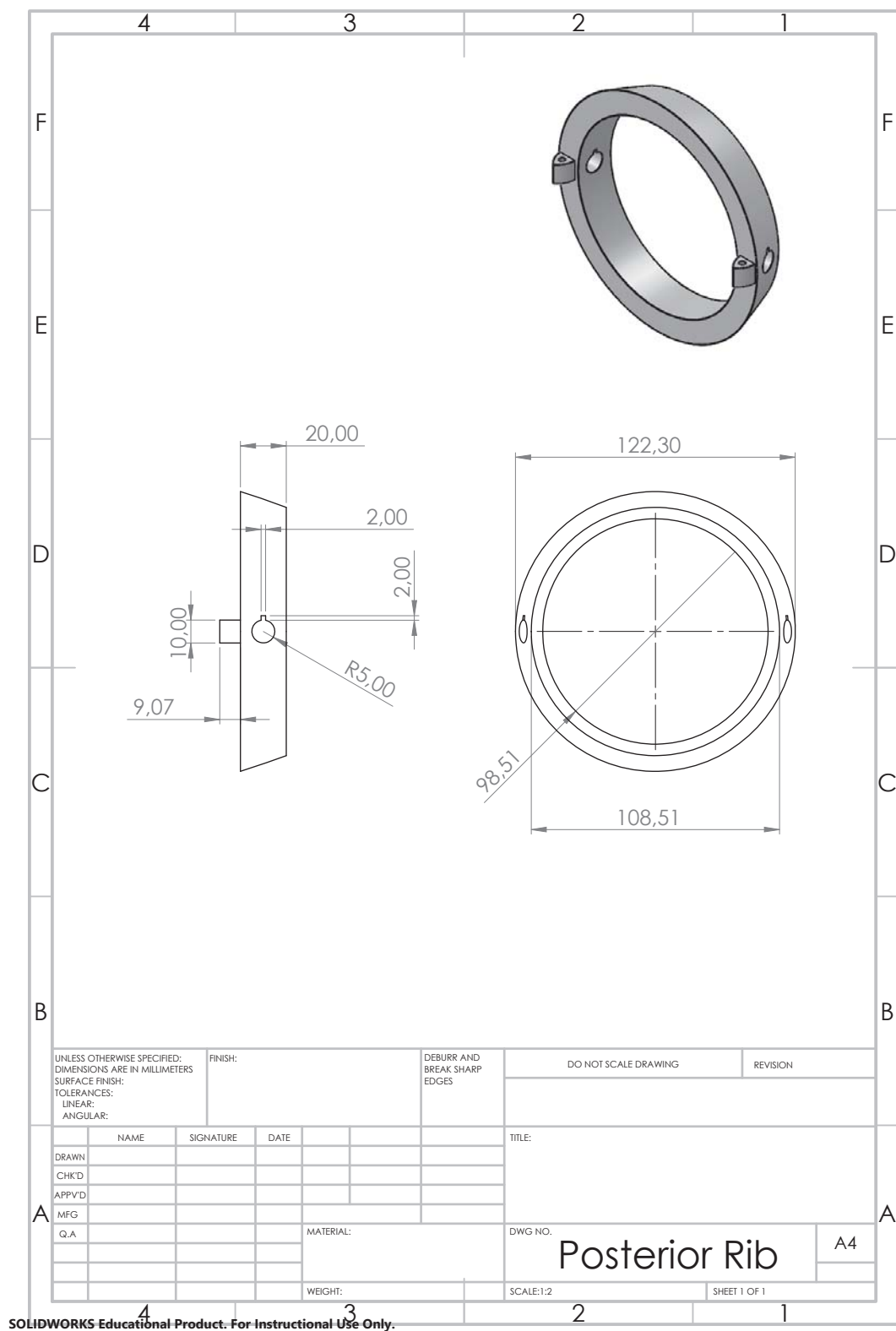


FIGURA C.6: Costela Posterior



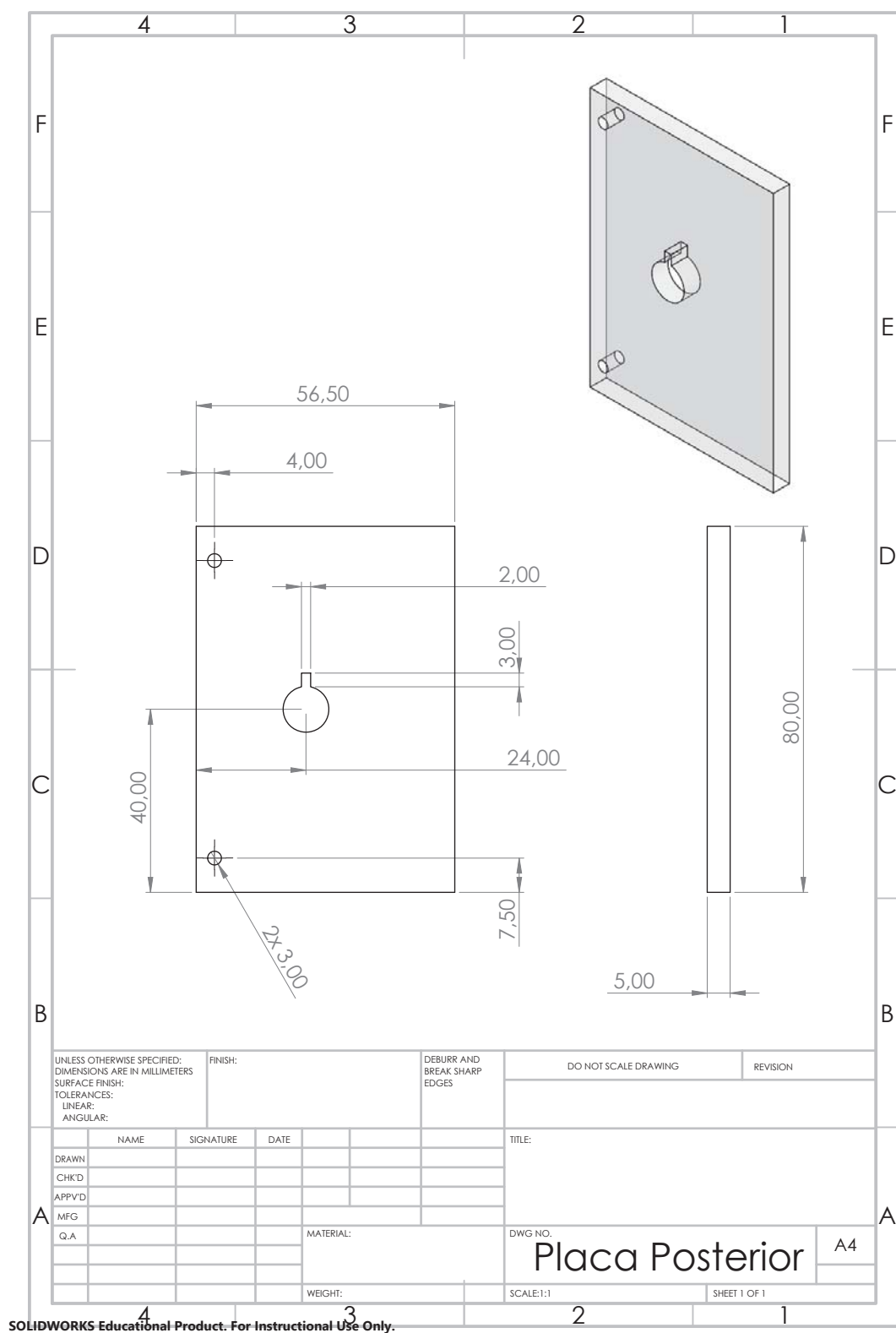


FIGURA C.8: Placa de Acrílico Posterior

# Apêndice D - Tanques de Flutuabilidade - Desenhos Técnicos

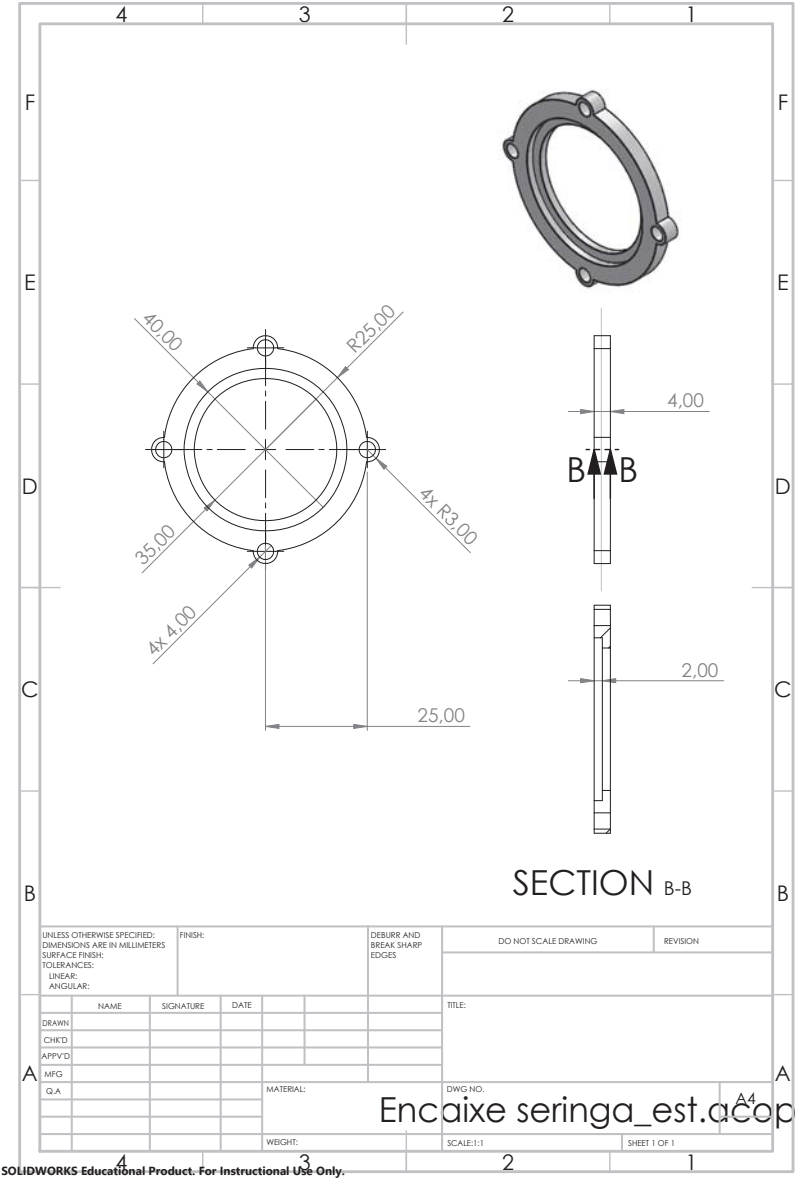


FIGURA D.1: Peça de Encaixe das Seringas à Estrutura de Acoplamento AV









# Apêndice E - Barbatanas Peitorais - Desenhos Técnicos

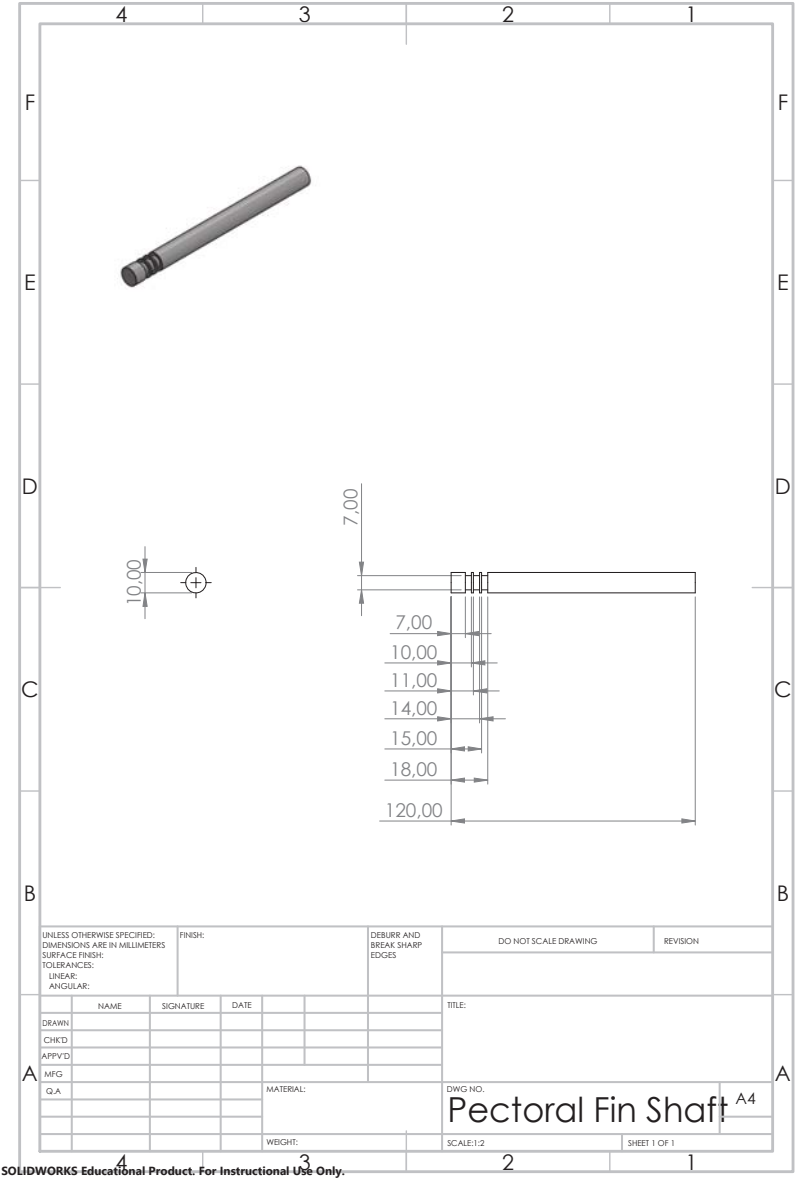
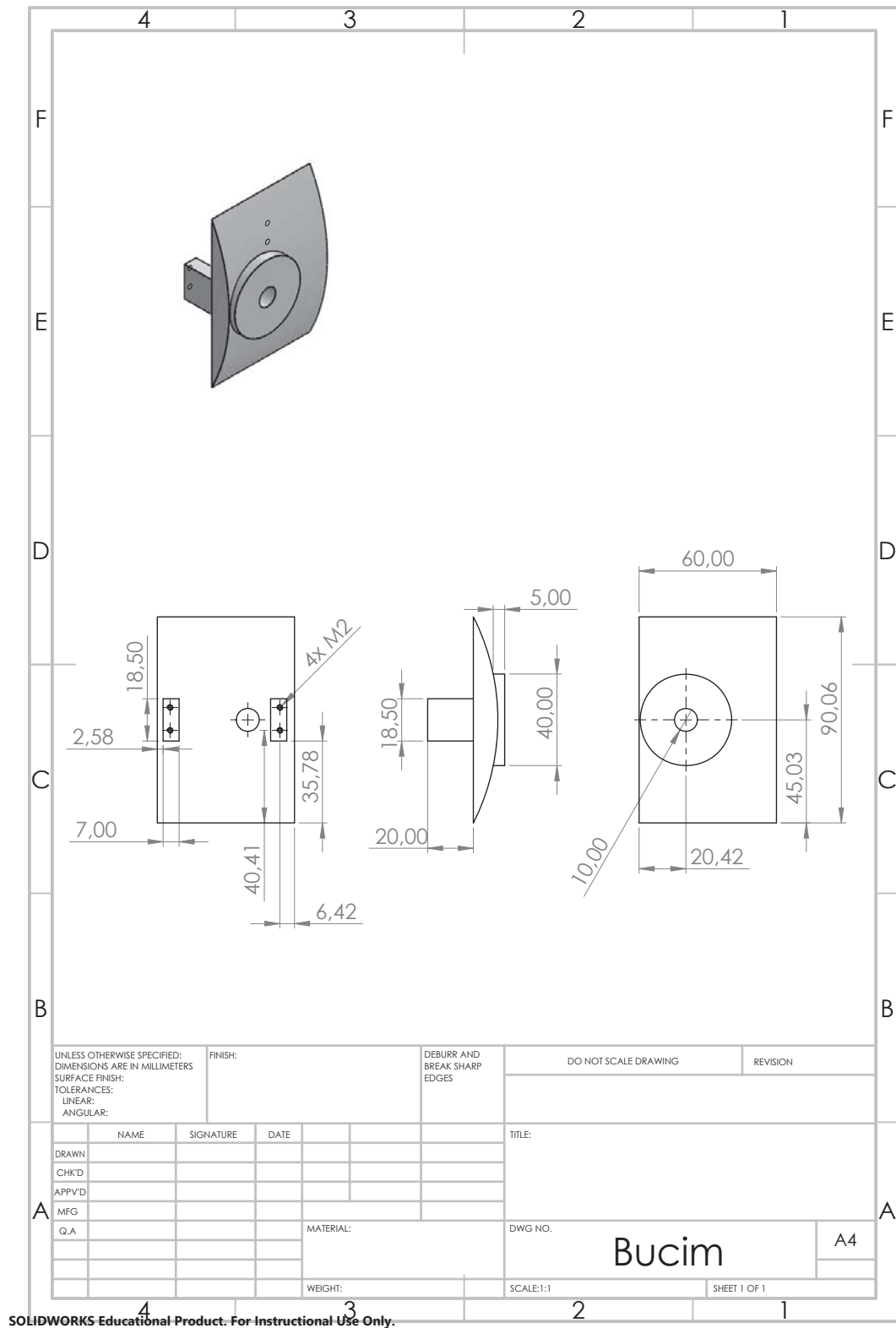


FIGURA E.1: Veio das Barbatanas Peitorais



SOLIDWORKS Educational Product. For Instructional Use Only.

FIGURA E.2: Bucim

Apêndice F - Barbatana Dorsal - Desenhos Técnicos

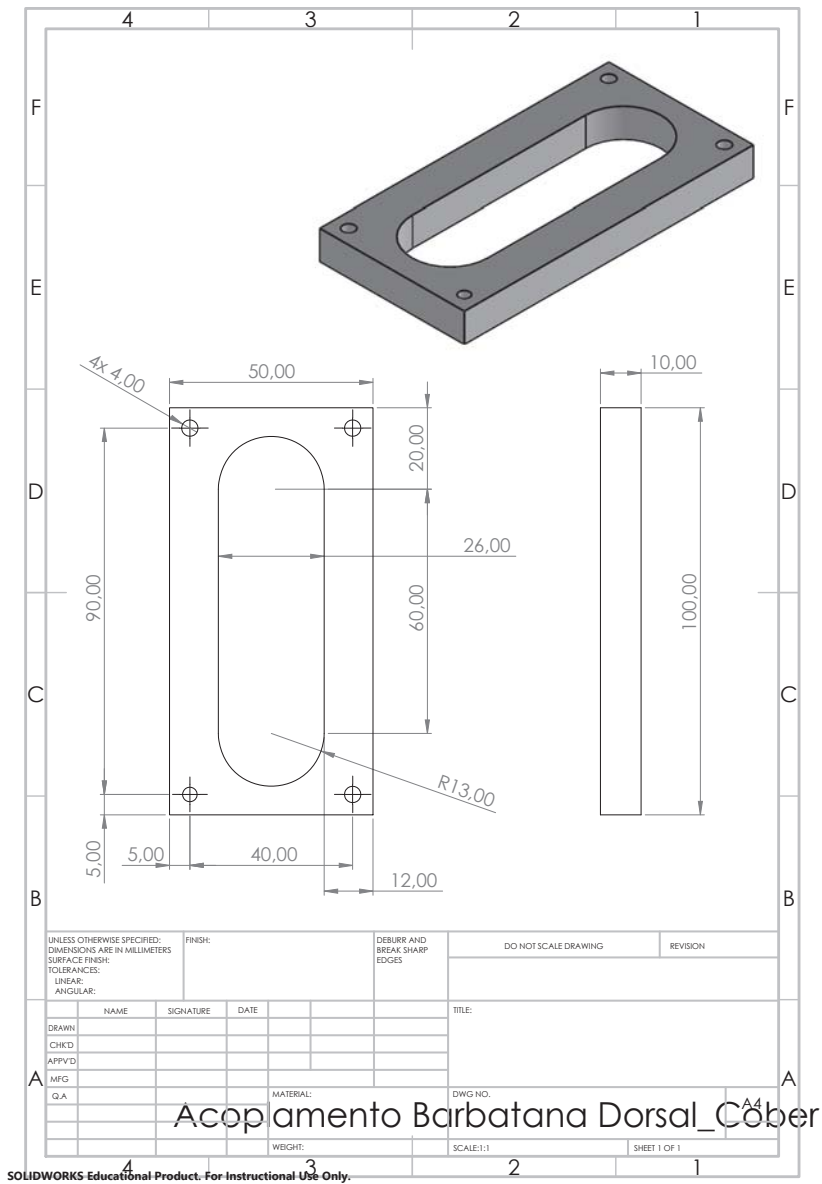


FIGURA F.1: Peça de Acoplamento Barbatana Dorsal/Pega Cobertura Central

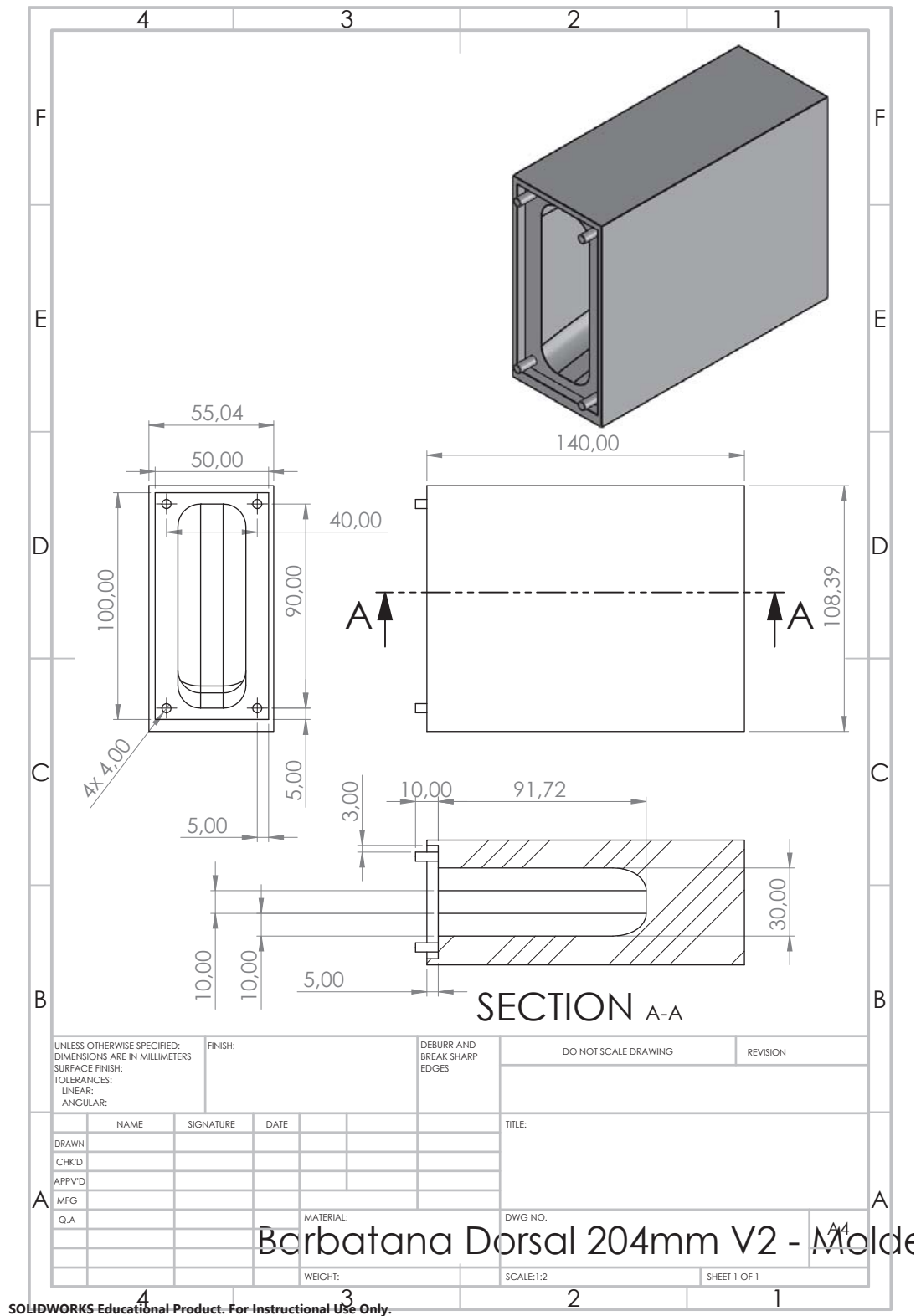


FIGURA F.2: Barbatana Dorsal V2 - Molde Exterior

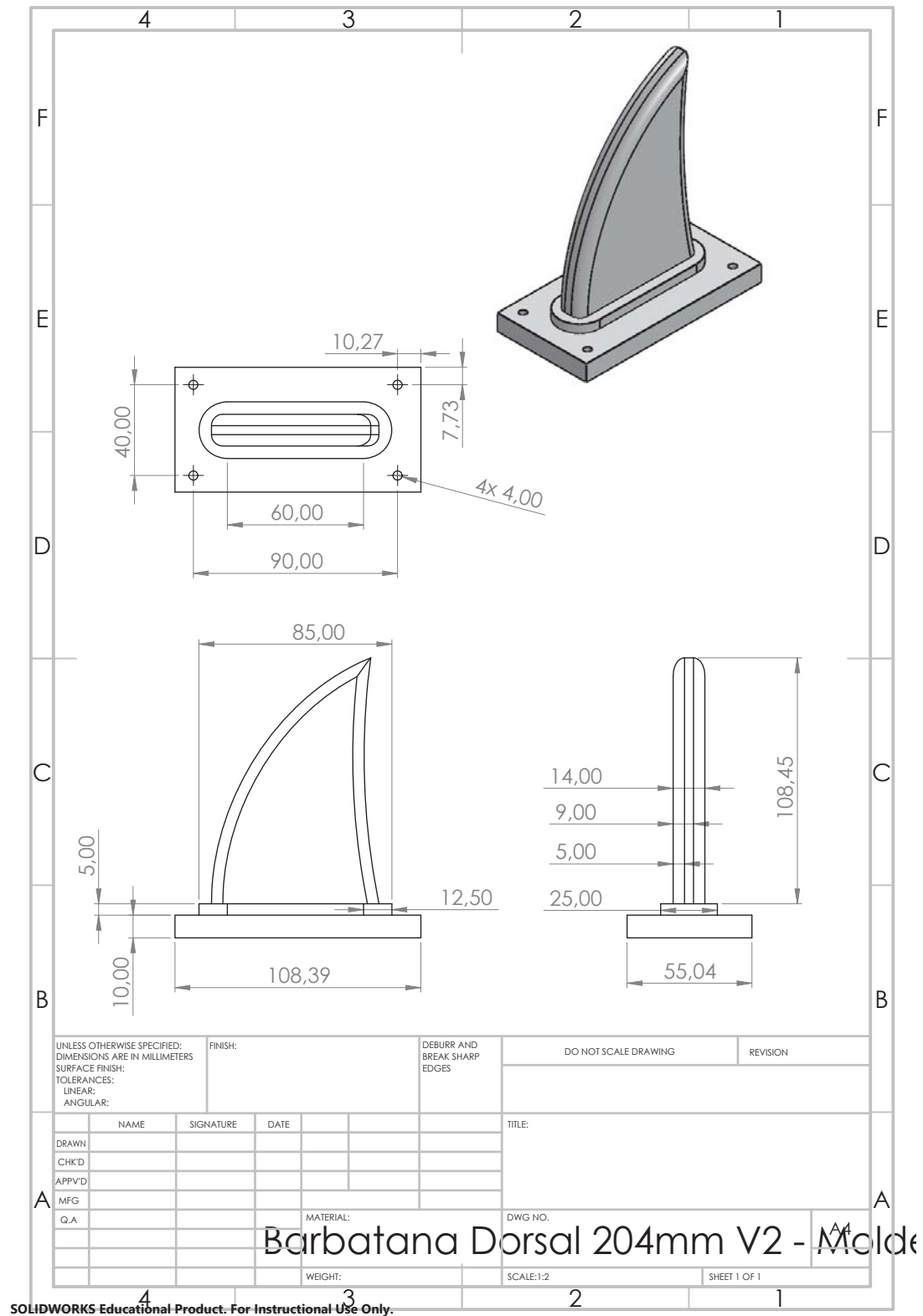


FIGURA F.3: Barbatana Dorsal V2 - Molde Interior

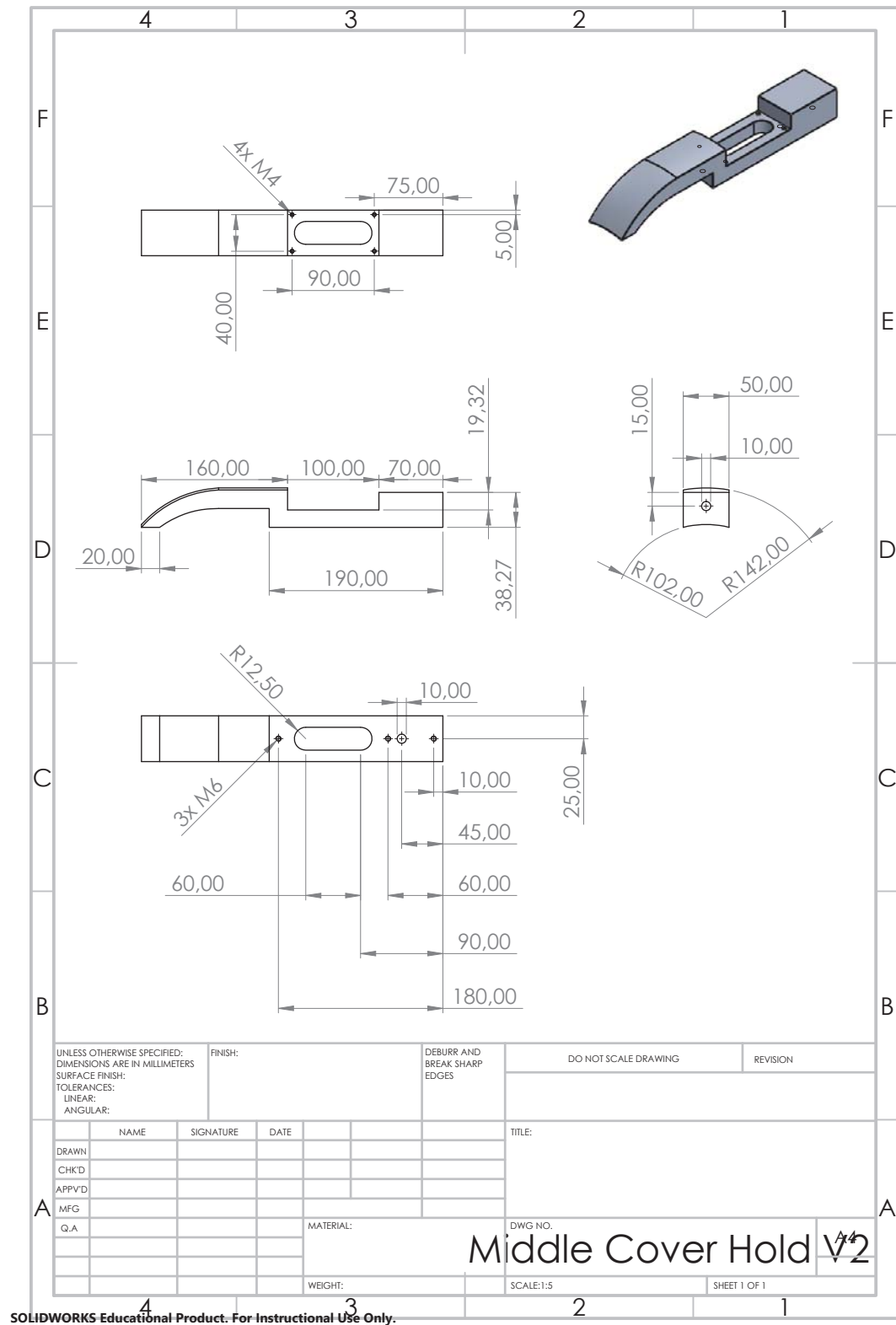


FIGURA F.4: Pega Cobertura Central V2



Apêndice G - Baterias - Desenhos Técnicos

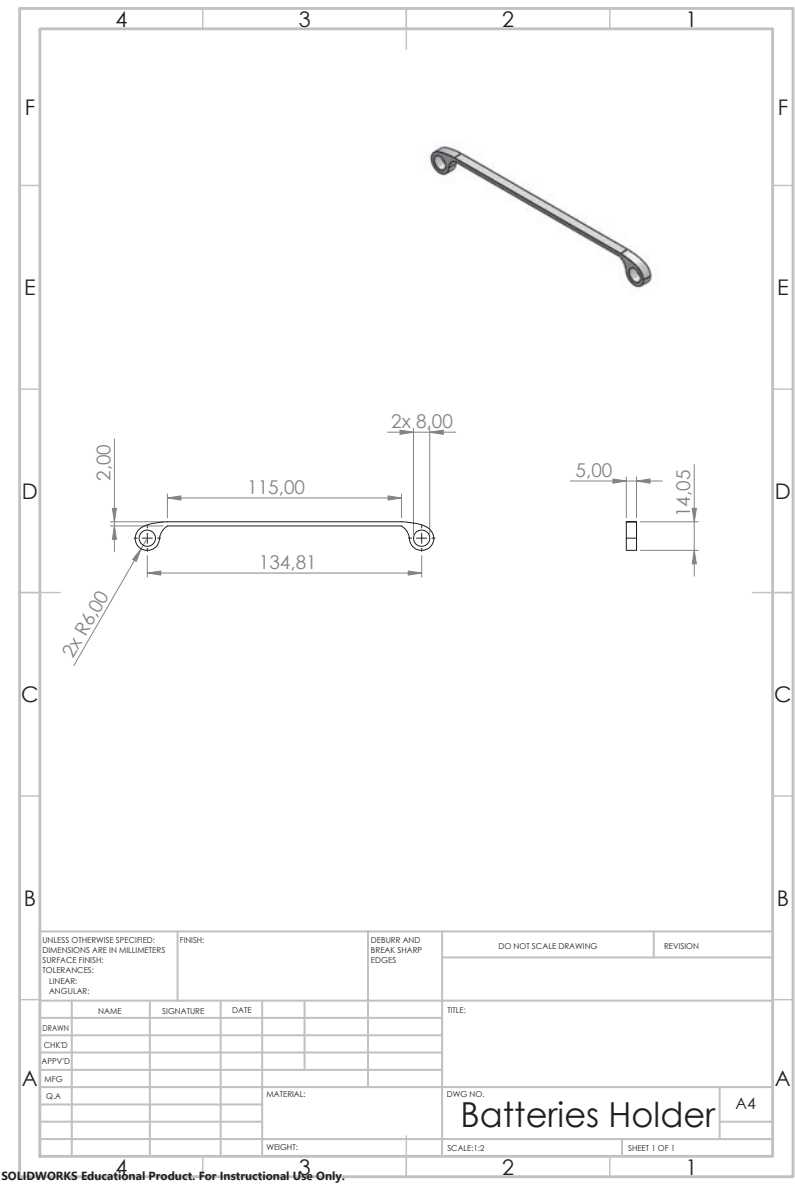


FIGURA G.1: Trinco das Baterias



# Anexo I - Resumo de vantagens e desvantagens da locomoção BCF

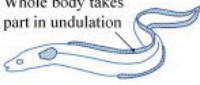

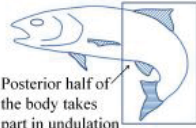
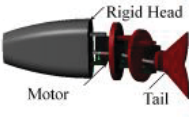


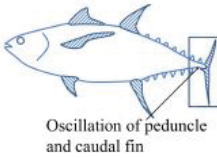

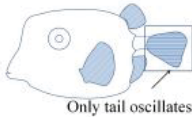
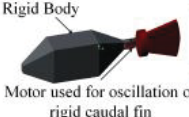
Diagram of Fish	Representative model	CAD	Typical mimicked features	Remarks on performance
<b>Anguilliform</b>  <p>Whole body takes part in undulation</p>	 <p>Motors</p>		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hyper-redundancy and full body undulation.</li> <li>• Increase in amplitude of undulation from head to tail.</li> <li>• Motion of robot in direction opposite to the movement of undulatory waves.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• High Maneuverability.</li> <li>• Low speed and hydrodynamic efficiency.</li> </ul>
<b>Subcarangiform</b>  <p>Posterior half of the body takes part in undulation</p>	 <p>Rigid Head Motor Tail</p>		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Undulation of posterior half of the robot.</li> <li>• Heavy body with more rounded anterior portion.</li> <li>• Caudal fin with low aspect ratio.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Speed higher than Anguilliform locomotion.</li> <li>• Maneuverability lower than Anguilliform locomotion.</li> </ul>
<b>Carangiform</b>  <p>Posterior one-third portion of the body takes part in undulation.</p>	 <p>Rigid two-third part of the body Motor to undulate last one-third portion of body and tail fin</p>		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Undulation of posterior one third portion of the robot.</li> <li>• Stiff caudal fin.</li> <li>• Moderately narrow necking of peduncle.</li> <li>• Concentration of mass towards the anterior portion of the body.</li> <li>• Angle of inclination of the caudal fin altered while moving from side to side.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Speed higher than Anguilliform or Subcarangiform locomotion.</li> <li>• Low maneuverability.</li> </ul>
<b>Thunniform</b>  <p>Oscillation of peduncle and caudal fin</p>	 <p>Motor used to undulate peduncle and caudal fin</p>		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Undulation of peduncle and caudal fin.</li> <li>• Streamlined body.</li> <li>• Rigid lunate tail fin.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Speed higher than Carangiform.</li> <li>• Maneuverability lower than Carangiform locomotion.</li> </ul>
<b>Ostraciiform</b>  <p>Only tail oscillates</p>	 <p>Rigid Body Motor used for oscillation of rigid caudal fin</p>		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Stiff body with pendulum-like oscillation of caudal fin.</li> <li>• Narrow peduncle.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Low hydrodynamic efficiency.</li> <li>• Low speed but high maneuverability.</li> </ul>

FIGURA I.1: Resumo de vantagens e desvantagens locomoção BCF  
 Fonte: Retirado de (Raj & Thakur, 2016)



## Anexo II - Resumo de vantagens e desvantagens da locomoção MPF


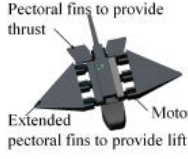




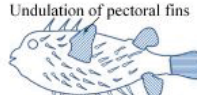

Diagram of Fish	Representative model	CAD	Typical mimicked features	Remarks on performance
<b>Rajiform</b>  Undulation and oscillation of extended pectoral fins	 Pectoral fins to provide thrust Extended pectoral fins to provide lift		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Large flexible triangular shaped pectoral fins.</li> <li>• Increase in undulation amplitude from anterior portion to fin apex.</li> <li>• Decrease in undulation amplitude from fin apex to the posterior portion.</li> <li>• Up and down flapping of fins.</li> <li>• Sharp angle of attack in pectoral fins.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Low speed.</li> <li>• Low to medium level of maneuverability.</li> </ul>
<b>Labriform</b>  Oscillation of pectoral fins	 Oscillation of pectoral fins connected to the body by means of motor		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Oscillating narrow-based pectoral fins.</li> <li>• Fan-like and rounded pectoral fins.</li> <li>• Fins brought far forward and then forced back broadside in rowing mode.</li> <li>• Up and down flapping fins in flapping mode.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Low speed and maneuverability.</li> </ul>
<b>Gymnotiform</b>  Undulation of extended anal fin	 Each of the fin element is rotated by means of motor		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hyper-redundancy of undulating anal fin.</li> <li>• Rigidity of the body.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• High maneuverability.</li> <li>• Speed higher than Labriform locomotion.</li> </ul>
<b>Diodontiform</b>  Undulation of pectoral fins	 Motor used to undulate flexible pectoral fin		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Broad undulating pectoral fin.</li> <li>• Placement of fin base in variable planes.</li> <li>• Changeable pectoral fin angle.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Speed higher than Labriform locomotion.</li> <li>• High but slow maneuverability.</li> </ul>

FIGURA II.1: Resumo de vantagens e desvantagens locomoção MPF

Fonte: Retirado de (Raj & Thakur, 2016)



## Anexo III - Características do Servo-motor JX BLS-12V7146

### Specification:

Dead band: 2 $\mu$ s  
Working frequency: 1520 $\mu$ s / 330hz  
Motor: brushless motor  
Operating Speed (11.1V): 0.12sec/60°  
Operating Speed (14V): 0.10sec/60°  
Stall Torque (11.1V): 38kg.cm  
Stall Torque (14V): 47kg.cm  
Dimensions: 40X20X37mm  
Weight: 71 g  
Connector Wire Length: JR 265 mm  
Bearing: 2BB

### Feature:

- 12V High voltage
- High performance programmable digital brushless standard servo
- High-precision Taiwan-made steel gears with hard anodizing
- Full CNC aluminium Shell structure
- Dual ball bearings
- Waterproof

FIGURA III.1: Características do Servo-motor JX BLS-12V7146  
Fonte: Imagem retirada do site do fabricante Banggood





## Anexo IV - Tubos de Aço Inox Disponíveis no Mercado

PT

ES

EN

(351) 226 198 530

S

metals

FMS

F. Marques da Silva S.A.

ENTRADA

EMPRESA

METAIS

GAMAS

SERVIÇOS

SETORES

+INFO ...

Anterior / Aço Inox / Seguinte

TUBO REDONDO DE AÇO INOXIDÁVEL



Pedido de cotação ...



D - Diâmetro

E - Espessura

Produto	Diâmetro	Espessura	Peso
Tubo Redondo de Aço Inoxidável	155 mm x	2,5 mm	9,414 Kg/m
Tubo Redondo de Aço Inoxidável	156 mm x	3 mm	11,334 Kg/m
Tubo Redondo de Aço Inoxidável	159 mm x	4 mm	15,310 Kg/m
Tubo Redondo de Aço Inoxidável	168,3 mm x	2 mm	8,213 Kg/m
Tubo Redondo de Aço Inoxidável	168,3 mm x	2,6 mm	10,638 Kg/m
Tubo Redondo de Aço Inoxidável	168,3 mm x	3 mm	12,245 Kg/m
Tubo Redondo de Aço Inoxidável	168,3 mm x	3,6 mm	14,641 Kg/m
Tubo Redondo de Aço Inoxidável	168,3 mm x	4 mm	16,228 Kg/m
Tubo Redondo de Aço Inoxidável	203 mm x	1,5 mm	7,463 Kg/m
Tubo Redondo de Aço Inoxidável	204 mm x	2 mm	9,976 Kg/m
Tubo Redondo de Aço Inoxidável	204 mm x	2 mm	9,976 Kg/m
Tubo Redondo de Aço Inoxidável	205 mm x	2,5 mm	12,501 Kg/m
Tubo Redondo de Aço Inoxidável	206 mm x	3 mm	15,038 Kg/m
Tubo Redondo de Aço Inoxidável	219,1 mm x	2 mm	10,722 Kg/m
Tubo Redondo de Aço Inoxidável	219,1 mm x	2,6 mm	13,900 Kg/m
Tubo Redondo de Aço Inoxidável	219,1 mm x	3 mm	16,008 Kg/m
Tubo Redondo de Aço Inoxidável	219,1 mm x	3,6 mm	19,157 Kg/m
Tubo Redondo de Aço Inoxidável	219,1 mm x	4 mm	21,246 Kg/m
Tubo Redondo de Aço Inoxidável	254 mm x	2 mm	12,445 Kg/m
Tubo Redondo de Aço Inoxidável	255 mm x	2,5 mm	15,587 Kg/m
Tubo Redondo de Aço Inoxidável	256 mm x	3 mm	18,742 Kg/m
Tubo Redondo de Aço Inoxidável	273 mm x	2 mm	13,384 Kg/m
Tubo Redondo de Aço Inoxidável	273 mm x	2,6 mm	17,360 Kg/m
Tubo Redondo de Aço Inoxidável	273 mm x	3 mm	20,001 Kg/m

FIGURA IV.1: Tubos de Aço Inox Disponíveis no Mercado  
Fonte: Retirado do site do fornecedor metais FMS

111



## Anexo V - Dimensionamento dos O-rings dos Discos Estruturais



FIGURA V.1: Dimensionamento dos O-rings dos Discos Estruturais  
Fonte: Retirado do site do fabricante ERIKS



## Anexo VI - Dimensionamento dos O-rings dos Varões das Barbatanas Laterais

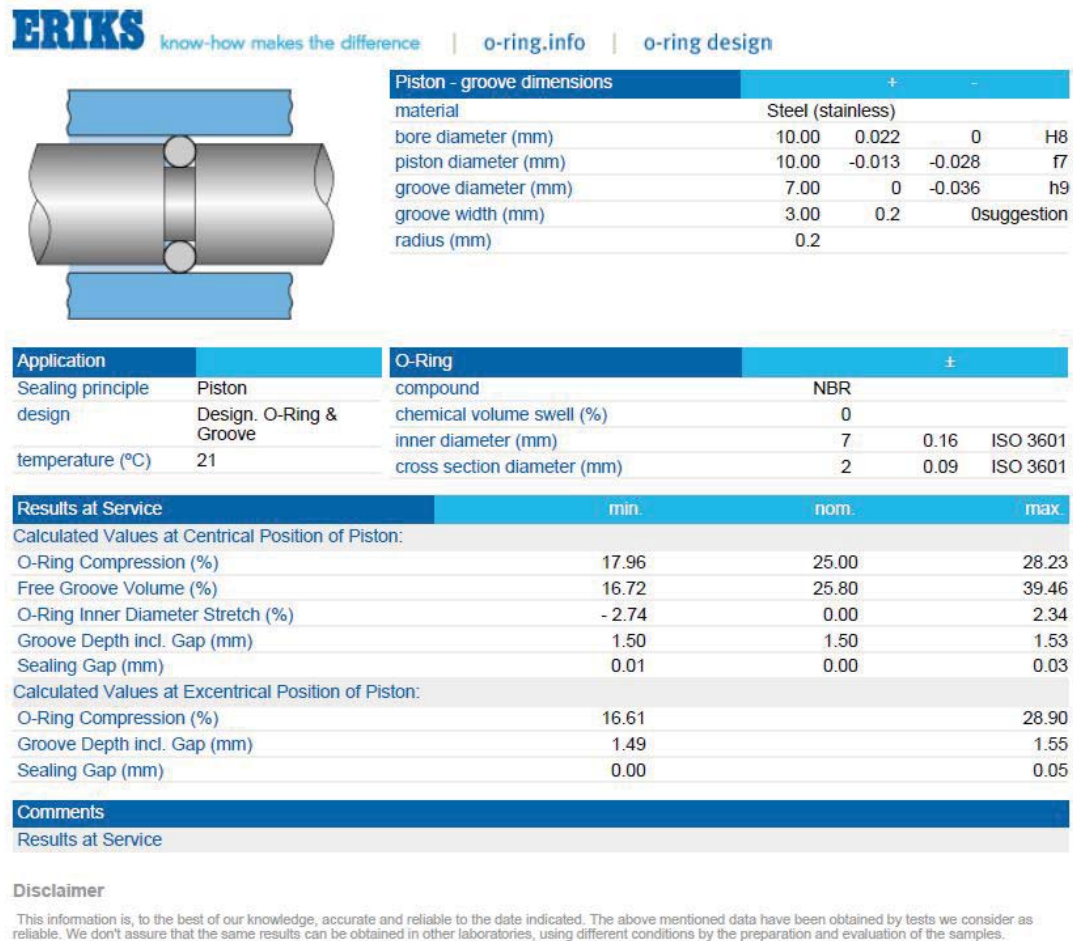


FIGURA VI.1: Dimensionamento dos O-rings dos Varões das Barbatanas Laterais

Fonte: Retirado do site do fabricante ERIKS



# Anexo VII - Características do Protótipo - Centro de Massa

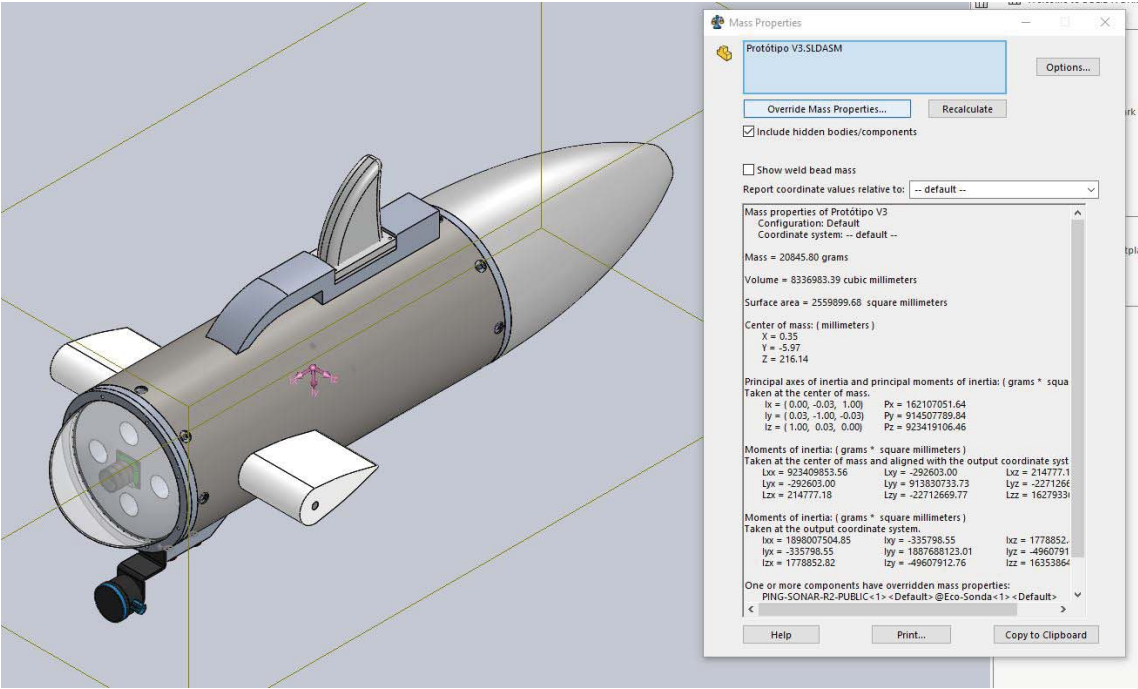


FIGURA VII.1: Características do Protótipo - Centro de Massa  
Fonte: Imagem retirada do desenho da peça em *SolidWorks*





## Anexo VIII - Características do Protótipo - Centro de Impulsão

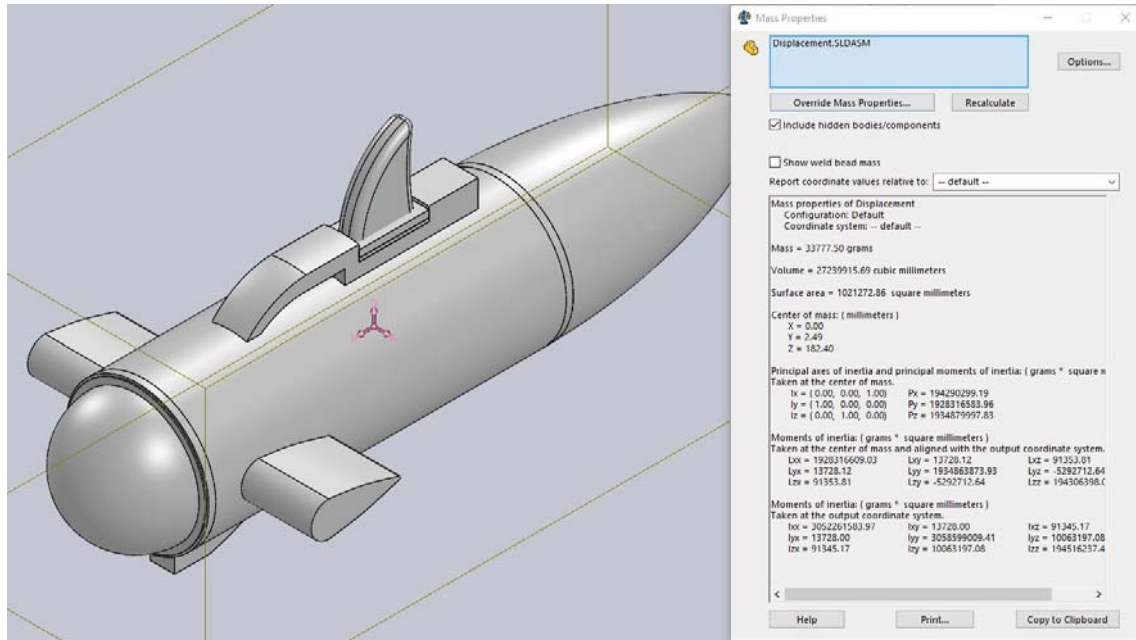


FIGURA VIII.1: Características do Protótipo - Centro de Impulsão  
Fonte: Imagem retirada do desenho da peça em *SolidWorks*